



TUGAS AKHIR - TE141599

**ANALISIS REDUKSI ARUS GANGGUAN DAN
PERBAIKAN TEGANGAN DIP PADA SISTEM JARINGAN
DISTRIBUSI RUNGKUT DENGAN SFCL TIPE AKTIF**

Arif Nugroho
NRP 2212106045

Dosen Pembimbing
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

[halaman ini sengaja dikosongkan]



FINAL PROJECT - TE141599

***ANALYSIS REDUCTION FAULT CURRENT AND
IMPROVEMENT VOLTAGE DIP IN RUNGKUT
DISTRIBUTION SYSTEM WITH ACTIVE TYPE SFCL***

Arif Nugroho
NRP 2212106045

Supervisors
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
SepuluhNopember Institute of Technology
Surabaya 2015

[halaman ini sengaja dikosongkan]

**ANALISIS REDUKSI ARUS GANGGUAN DAN
PERBAIKAN TEGANGAN DIP PADA SISTEM
JARINGAN DISTRIBUSI RUNGKUT DENGAN SFCL
TIPE AKTIF**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Ardyono Privadi, ST., M. Eng.

NIP. 197309271998031004

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

NIP. 197411292000121001

**SURABAYA
JANUARI, 2015**

ANALISIS REDUKSI ARUS GANGGUAN DAN PERBAIKAN TEGANGAN DIP PADA SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI RUNGKUT DENGAN SFCL TIPE AKTIF

Nama : Arif Nugroho
Pembimbing 1 : Dr. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng.
Pembimbing 2 : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRAK

Pada Tugas akhir ini, dampak dari pemasangan *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) tipe aktif pada jaringan distribusi Rungkut PT PLN APJ Surabaya Selatan penyulang bandilan akan dihitung dan dianalisa. Sistem distribusi yang digunakan adalah jaringan radial. Dengan mengontrol arus injeksi dibelitan sekunder SFCL, tegangan pada belitan primer SFCL akan diatur menjadi nol. Sehingga, saat tidak terjadi gangguan di jaringan distribusi, SFCL tidak akan mempengaruhi jaringan distribusi dan saat terjadi gangguan di jaringan distribusi, SFCL akan menaikkan nilai impedansinya dan mengurangi besarnya arus gangguan serta memperbaiki tegangan dip. Dalam kasus ini akan diperhitungkan arus hubung singkat dan tegangan dip dengan memodelkan jaringan distribusi tanpa dengan penambahan generator distribusi dan dengan penambahan generator distribusi serta dengan jarak gangguan yang berbeda-beda. Hasil perhitungan arus hubung singkat dan tegangan dip pada jaringan tanpa penambahan generator distribusi akan dibandingkan dengan jaringan yang ditambahkan generator distribusi, serta membandingkan saat jaringan sebelum dipasang SFCL tipe aktif dan setelah dipasang SFCL tipe aktif.

Kata kunci : *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) tipe aktif, distribusi rungkut, jaringan radial, arus hubung singkat, tegangan dip, generator distribusi

ANALYSIS REDUCTION FAULT CURRENT AND IMPROVEMENT VOLTAGE DIP IN RUNGKUT DISTRIBUTION SYSTEM WITH ACTIVE TYPE SFCL

Name : Arif Nugroho
Supervisor 1 : Dr. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng.
Supervisor 2 : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRACT

In this final project, the effects of a Active Type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) installed in Rungkut distribution system PT PLN APJ Surabaya Selatan bandilan feeders will be counted and analyzed. The distribution system used radial network. By controlling the injection current in secondary winding SFCL, the voltage on the primary winding SFCL will be set to zero . So, when there is no fault in the distribution network, SFCL will not affect the current distribution network and when the fault is detected in distribution network, SFCL will raise the value of the impedance and reduce the magnitude of fault current and improve the voltage dip. In this case will be taken into account short-circuit current and voltage dip by modeling the distribution network without the addition of distributed generation and with the addition of the distributed generation and change fault positions. The results of calculation short circuit currents and voltage dip on the network without the addition distributed generation will be compared with the distribution network with added distributed generation, as well as comparing the distribution network before and after installed Active Type SFCL.

Keyword : Active Type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), Rungkut distribution, radial network, shortcircuit current, voltage dip, distributed generation

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institute Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama pelaksanaan tugas akhir hingga penyusunan laporan proyek akhir ini banyak pihak yang telah membantu, membimbing dan memberi motivasi kepada penulis. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu, Ayah, dan adik-adikku tercinta yang selalu memberi dukungan, semangat serta doa untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng dan Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan ilmu, saran serta membimbing saya dalam melaksanakan tugas akhir.
3. Seluruh karyawan PT. PLN APJ Surabaya Selatan dan Rayon Rungkut yang telah membantu saya dalam proses pengambilan data.
4. Seluruh rekan-rekan yang membantu penulis sehingga tugas akhir ini bisa tersusun.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan dan penulisan laporan ini masih banyak terdapat kekurangan, sehingga penulis dengan senang hati menerima saran maupun kritik yang bersifat membangun dari pembaca untuk menjadi bahan evaluasi penulis untuk lebih baik di masa mendatang. Akhir kata penulis berharap laporan ini dapat bermanfaat dan menambah ilmu pengetahuan bagi pembaca.

Surabaya, Desember 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Tugas Akhir	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
 BAB II DASAR TEORI	 5
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	5
2.1.1 Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer	7
2.1.1.1 Jaringan Radial	7
2.1.1.2 Jaringan Hantaran Penghubung (<i>Tie Line</i>)	8
2.1.1.3 Jaringan Lingkar (<i>Loop</i>)	9
2.1.1.4 Jaringan Spindel	9
2.1.1.5 Sistem Gugus Atau Sistem Kluster	10
2.1.2 Jaringan Pada Sistem Distribusi Sekunder	11
2.1.3 Komponen Sistem Distribusi	12
2.1.3.1 Gardu Distribusi/Gardu Tiang	12
2.1.3.2 Konduktor Sistem Distribusi	13
2.1.3.3 Tiang Listrik	14
2.1.3.4 Isolator	15
2.1.3.5 Pemutus Tenaga	15

2.1.3.6	<i>Recloser</i> /Penutup Balik Otomatis.....	16
2.1.4	Gangguan Saluran Udara Tegangan Menengah.....	16
2.2	Gangguan Hubung Singkat.....	17
2.3	Perhitungan Arus Hubung Singkat	18
2.4	Kedip Tegangan	20
2.4.1	Penyebab Tegangan Kedip	22
2.4.2	Besaran Tegangan Kedip/ <i>Voltage Dip</i> Pada Sistem Radial.....	22
2.5	<i>Distributed Generation</i> (DG)	22

BAB III PENERAPAN SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT

	LIMITER TIPE AKTIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI.....	25
3.1	Data Sistem Jaringan Distribusi Rungkut	25
3.2	<i>Superconducting Fault Current Limiter</i> (SFCL)	28
3.2.1	Penerapan <i>Superconducting Fault Current Limiter</i> (SFCL) Tipe Aktif	30
3.2.2	Penerapan SFCL Tipe Aktif Untuk Mereduksi Arus Hubung Singkat	33
3.2.3	Penerapan SFCL Tipe Aktif Pada Tegangan Kedip	34

BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1	Analisa Kerja <i>Superconducting Fault Current Limiter</i> Tipe Aktif Saat Kondisi Normal	35
4.2	Analisis Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan	37
4.2.1	Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan.....	37
4.2.2	Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa	41
4.3	Analisis Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan <i>Distributed Generation</i>	45
4.3.1	Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan <i>Distributed Generation</i> (DG)	46
4.3.2	Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa.....	49

BAB V PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	57

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Impedansi Kawat Penghantar AAAC.....	14
Tabel 3.1 Data Jaringan Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan	25
Tabel 3.2 Data Beban Jaringan Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan	27
Tabel 3.3 Parameter SFCL Tipe Aktif	33
Tabel 4.1 Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Bandilan	38
Tabel 4.2 Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa	42
Tabel 4.3 Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG	46
Tabel 4.4 Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa.....	50

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga	6
Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Radial	8
Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Hantaran Penghubung	9
Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Loop	9
Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Spindel	10
Gambar 2.6 Konfigurasi Sistem Kluster	11
Gambar 2.7 Hubungan Tegangan Menengah ke Tegangan Rendah ..	11
Gambar 2.8 Gangguan Pada Jaringan Radial	17
Gambar 2.9 Hubung Singkat Antar Fasa Langsung	19
Gambar 2.10 Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah	19
Gambar 3.1 Aplikasi SFCL Tipe Aktif Dijaringan Distribusi	29
Gambar 3.2 Rangkaian Pengganti Satu Fasa SFCL Tipe Aktif	30
Gambar 3.3 Rangkaian Ekuivalen SFCL Tipe Aktif	30
Gambar 4.1 Gelombang Tegangan Saat Keadaan Normal	36
Gambar 4.2 Gelombang Arus Saat Keadaan Normal	36
Gambar 4.3 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL tipe aktif	40
Gambar 4.4 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL tipe aktif	41
Gambar 4.5 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL Tipe Aktif	44
Gambar 4.6 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL Tipe Aktif	44
Gambar 4.7 Penambahan Generator Pada Jaringan Distribusi	45
Gambar 4.8 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Tanpa SFCL Tipe Aktif	48
Gambar 4.9 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Dan SFCL Tipe Aktif	49

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan distribusi merupakan jaringan yang paling dekat dengan konsumen/pelanggan. Dalam operasi sistem tenaga listrik kadang terjadi gangguan-gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Gangguan adalah penghalang dari suatu sistem yang sedang beroperasi atau suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari kondisi normal. Permasalahan kualitas daya umumnya adalah dampak dari penyimpangan tegangan, arus atau frekuensi yang dapat menyebabkan kegagalan atau kesalahan operasi pada peralatan penyedia layanan maupun konsumen. Penyimpangan ini dapat disebabkan gangguan di jaringan, baik hubung singkat pada sistem, kenaikan arus dan beban secara mendadak, maupun kegagalan kerja peralatan. Arus gangguan yang terlalu besar dapat merusak peralatan di jaringan distribusi bahkan tidak cukup teramankan oleh peralatan-peralatan proteksi yang terpasang. Gangguan hubung singkat juga mengakibatkan kedip tegangan. Berdasarkan IEEE Standar 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, voltage sag atau tegangan kedip adalah penurunan tegangan rms pada pergeseran 10% hingga 90% untuk nilai amplitudo selama 0.5 cycle hingga kurang dari satu menit. Untuk mengatasi hal tersebut dipasanglah SFCL (*Superconducting Fault Current Limiter*) tipe aktif untuk mereduksi arus gangguan dan memperbaiki kedip tegangan. Sehingga dapat menghindari kerusakan pada peralatan distribusi dan meningkatkan sistem keamanan dan keandalan.

1.2 Permasalahan

Pada tugas akhir ini membahas permasalahan yang berjudul Analisis Reduksi Arus Gangguan dan Perbaikan Tegangan Dip pada Sistem Distribusi Rungkut dengan SFCL tipe Aktif, yaitu bagaimana pengaruh pemasangan SFCL tipe Aktif terhadap besarnya arus hubung singkat dan tegangan kedip.

1.3 Batasan Masalah

Adapun permasalahan dan batasan masalah yang akan dibahas pada tugas akhir kali ini adalah:

1. Analisa pada sistem jaringan distribusi Rungkut penyulang Bandilan.
2. Analisis dan simulasi akibat gangguan hubung singkat dan tegangan dip sistem jaringan distribusi Rungkut penyulang Bandilan.
3. Superconducting Fault Current Limiter yang digunakan adalah tipe aktif.
4. Perangkat lunak yang digunakan dalam analisis adalah software Matlab.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari penambahan Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) tipe aktif terhadap besar arus gangguan dan tegangan dip yang terjadi pada sistem distribusi Rungkut.

1.5 Metodologi

Metode penyelesaian masalah dalam pembuatan tugas akhir adalah:

1. Studi Literatur
Mengumpulkan buku dan referensi mengenai Analisis sistem Tenaga yang khusus membahas Arus gangguan dan SFCL tipe Aktif.
2. Pengumpulan Data
Data yang dibutuhkan untuk simulasi ini adalah data diagram satu garis (Single Line Diagram) serta data peralatan-peralatan listrik yang ada pada jaringan distribusi Rungkut.
3. Pengolahan Data dan Pemodelan sistem.
Menginterpretasikan dan menganalisis data yang diperoleh untuk disesuaikan dengan jenis dan format yang dibutuhkan untuk simulasi sistem dengan komputer. Setelah itu dilakukan pemodelan sistem sesuai dengan data yang diperoleh dengan menggunakan software Matlab.
4. Simulasi dan Analisis Data
Dalam tahap ini dilakukan simulasi dengan komputer dengan menggunakan software Matlab Setelah dilakukan

simulasi, kemudian dilakukan pengamatan dan analisis data. Data yang akan dianalisis adalah besar arus gangguan dan tegangan dip akibat hubung singkat pada lokasi gangguan yang berbeda-beda dan membandingkan besar arus gangguan ketika jaringan distribusi dengan dan tanpa SFCL tipe aktif. Serta besar arus gangguan dan tegangan dip ketika di pasang *Distributed Generation* (DG) pada sistem distribusi tenaga listrik dengan dan tanpa SFCL tipe aktif.

5. Penulisan Buku Tugas Akhir.

Penulisan buku dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan tersebut merupakan solusi dari permasalahan yang ada. Selain itu akan diberikan saran dan rekomendasi terhadap sistem jaringan distribusi sehingga mendapatkan rekomendasi yang diperlukan untuk menyediakan pasokan energi listrik dengan kualitas yang baik bagi konsumen.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

1. Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

2. Bab 2 : Dasar Teori

Berisi tentang teori arus hubung singkat dan penjelasan tentang sistem distribusi 20 kV secara umum.

3. Bab 3 : Penerapan *Superconducting Fault Current Limiter*

Tipe Aktif Pada Jaringan Distribusi.

Bab ini membahas mengenai *Superconducting Fault Current Limiter* pada sistem distribusi tenaga listrik, prinsip kerja, pemodelan SFCL tipe aktif serta sistem distribusi Rungkut yang akan dijadikan objek penelitian.

4. Bab 4 : Perhitungan dan Analisa
Bab ini membahas perhitungan penerapan SFCL tipe aktif dan analisa pada sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah pemasangan peralatan SFCL.
5. Bab 5 : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat dalam perancangan jaringan distribusi untuk mereduksi arus gangguan dan meningkatkan kualitas daya listrik karena adanya tegangan kedip.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

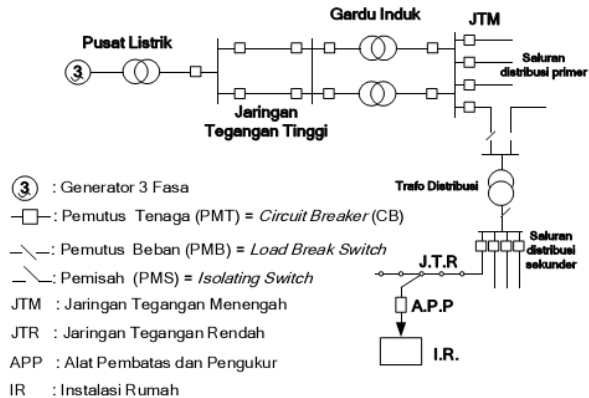
Pusat tenaga listrik umumnya terletak jauh dari pusat beban. Energi listrik yang dihasilkan pusat pembangkit disalurkan melalui jaringan transmisi. Tegangan generator pembangkit relatif rendah (6kV -24 kV). Maka tegangan ini dinaikan dengan transformator daya ke tegangan yang lebih tinggi antara 150 kV-500 kV . Tujuan dari peningkatan tegangan adalah untuk memperbesar daya hantar saluran, juga untuk memperkecil rugi daya dan susut tegangan pada saluran transmisi. Sebelum masuk ke konsumen tegangan akan diturunkan melalui gardu induk (GI), menurunkan tegangan dari 500kV ke 150kV atau dari 150kV ke 70kV. Yang kedua dilakukan pada gardu induk distribusi dari 150kV ke 20kV atau dari 70kV ke 20kV [1].

Jaringan distribusi merupakan bagian sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan, dan bertugas menyalurkan tenaga listrik dari stasiun-stasiun suplay tenaga listrik kepada pelanggan. Dalam pengoperasian sistem distribusi, masalah yang utama adalah mengatasi gangguan karena jumlah gangguan pada sistem distribusi relative lebih banyak bila dibandingkan dengan jumlah gangguan pada sisi pembangkit maupun transmisi. Dengan memperhatikan masalah ini, maka dalam perencanaan pengembangan sistem tenaga listrik senantiasa disertai upaya-upaya guna penyempurnaan operasi sistem distribusi.

Sistem tenaga listrik merupakan sistem sarana penyaluran tenaga listrik dari titik sumber ke titik pusat beban. Penyaluran tenaga listrik ini mempunyai peranan penting dalam menyuplai tenaga listrik ke konsumen, Hal ini dikarenakan apabila terjadi gangguan pada penyaluran tenaga listrik maka dapat mengakibatkan kerugian baik pada konsumen maupun pada PLN sendiri.

Jaringan distribusi dari gardu induk sampai ke kWh meter ditempat konsumen , terdiri dari dua bagian yaitu jaringan distribusi primer atau yang dikenal dengan jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan sekunder atau yang dikenal dengan jaringan tegangan rendah (JTR). Jaringan tegangan menengah umumnya bekerja pada tegangan 20 kV, sedangkan jaringan tegangan rendah umumnya bekerja pada tegangan 380/220 Volt. Pengelompokan ini didasarkan pada kebutuhan tenaga listrik yang

berbeda dari pelanggan. Pelanggan dengan daya tersambung besar dihubungkan dengan jaringan tegangan menengah, sedangkan pelanggan dengan daya tersambung kecil dihubungkan dengan jaringan tegangan rendah.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Proses penyampaian tenaga listrik sesuai dengan Gambar 2.1 diatas yaitu dimulai dari pembangkitan tenaga listrik yaitu berupa generator 3 fasa yang dilakukan di pusat listrik, kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Sebelum disalurkan, tegangan energy listrik dinaikkan terlebih dahulu menjadi tegangan transmisi. Karena disalurkan melalui Jaringan Tegangan Tinggi, maka tegangannya dinaikkan dengan menggunakan trafo step-up. Kemudian disalurkan menuju gardu induk pusat. Di gardu induk pusat, tegangan diturunkan dengan menggunakan trafo step-down, untuk disalurkan ke sistem distribusi, melalui saluran distribusi primer (Jaringan Tegangan Menengah).

Tenaga listrik yang telah diturunkan tegangannya (menjadi 20 kV), kemudian disalurkan menuju trafo distribusi melalui Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Pada jaringan tegangan menengah terdapat alat pengaman atau proteksi berupa PMT (Pemutus Tenaga) yang berfungsi untuk memutus arus gangguan, serta menghubungkan daya listrik. PMB (Pemutus beban) yang berfungsi untuk memutus arus listrik yang disalurkan pada beban. Kemudian PMS (pemisah) yaitu suatu alat yang berfungsi untuk memutuskan

tegangan untuk memisahkan suatu peralatan listrik lainnya yang masih bertegangan dan untuk mengamankan peralatan listrik dari sisa tegangan akibat induksi dari peralatan lainnya. Selanjutnya masuk ke trafo distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan distribusi primer (20 kV) menjadi tegangan rendah (380/220 V), yang didistribusikan kekonsumen melalui Jaringan Tegangan Rendah. Konsumen tenaga listrik disambung dari Jaringan Tegangan Rendah melalui Sambungan Rumah (SR). Kemudian tenaga listrik masuk ke APP (Alat Pembatas dan Pengukur), yang berfungsi untuk membatasi daya energi listrik dan mengukur pemakaian energi listrik oleh konsumen. Setelah dari APP baru energi listrik tersebut dapat dikonsumsi oleh konsumen melalui Instalasi Rumah (IR).

2.1.1 Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer merupakan sistem yang berada diantara gardu induk dan trafo distribusi. Sebuah sistem distribusi primer terdiri dari feeder utama berupa rangkaian tiga fasa empat kawat atau tiga fasa tiga kawat, dan percabangan atau lateral, yang bisaanya berupa rangkakan satu fasa atau tiga fasa yang terhubung ke feeder utama. Umumnya lateral atau sublateral yang berlokasi diperumahan atau pedesaan terdiri dari satu penghantar fase dan netral.

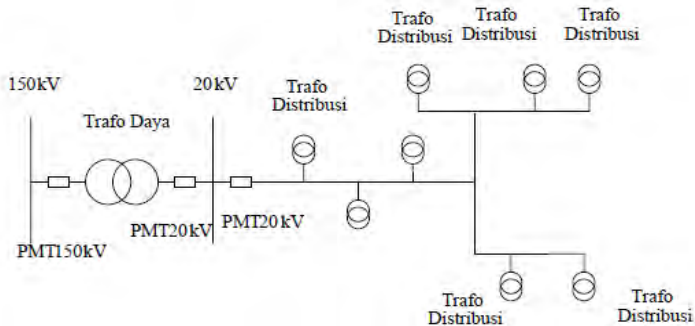
Sebuah sistem distribusi primer dibagi menjadi beberapa bagian menggunakan penutup balik otomatis (*PBO-automatic circuit recloser*), *Air Break Swicth* (ABSW), atau *Load Break Swicth* (LBS) pada beberapa lokasi agar ketika terjadi gangguan maka jaringan yang mengalami gangguan tersebut dapat dipisahkan sehingga dapat pula meminimalisasi banyak pelanggan padam.

Jaringan Pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer 20kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (*Loop*), Jaringan Spindel dan Sistem Gugus atau Kluster.[1]

2.1.1.1 Jaringan Radial

Sistem distribusi dengan pola Radial merupakan sitem distribusi sederhana dimana satu penyulang mempunyai feeder tertentu. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 adalah bentuk umum yang sering dipakai. Sistem ini digunakan untuk melayani

daerah-daerah dengan kepadatan beban ringan dimana jaringan primer dan sekundernya bisaanya merupakan saluran udara. Fedeer pada jaringan ini dapat berupa *fedeer* (Jaringan utama) dan cabang-cabang (terdiri dari lateral dan sublateral) yang dihubungkan dengan trafo distribusi baik trafo satu fase atau tiga fase.



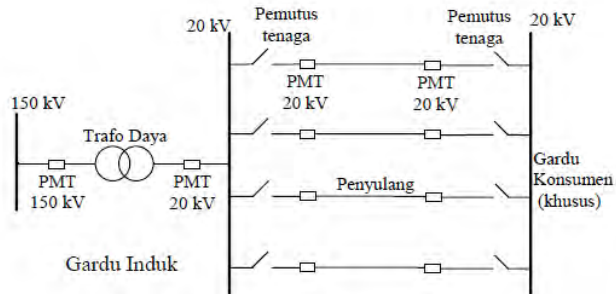
Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Radial

Keunggulan dari sistem distribusi dengan pola radial adalah biaya investasi yang murah, karena saluran yang menuju tiap beban hanya tersedia satu jalur. Namun sistem distribusi dengan pola radial juga mempunyai kekurangan yaitu keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai trafo distribusi dan tidak ada sumber lain yang berfungsi sebagai *back-up*, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh jaringan akan ikut padam.

Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran.

2.1.1.2 Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

Sistem distribusi *Tie Line* seperti Gambar 2.3 digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam (Bandar Udara, Rumah Sakit, dan lain – lain).

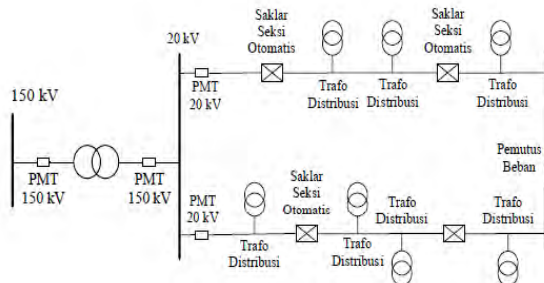


Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Hantaran Penghubung

Sistem ini memiliki minimal dua penyalang sekaligus dengan tambahan *Automatic Change Over Switch/Automatic Transfer Switch*, setiap penyalang terkoneksi ke gardu pelanggan khusus tersebut sehingga bila salah satu penyalang mengalami gangguan maka pasokan listrik akan di pindah ke penyalang lain.

2.1.1.3 Jaringan Lingkar (*Loop*)

Pada Jaringan Tegangan Menengah Struktur Lingkaran (*Loop*) seperti Gambar 2.4 dimungkinkan pemasokannya dari beberapa gardu induk, sehingga dengan demikian tingkat keandalannya relatif lebih baik.

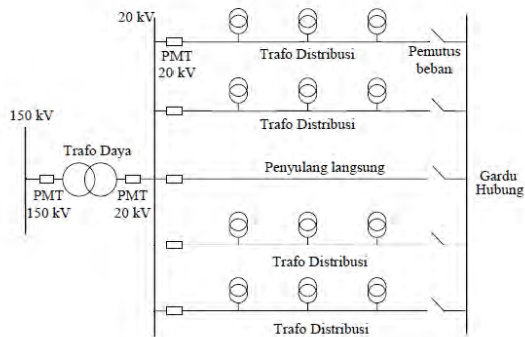


Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Loop

2.1.1.4 Jaringan Spindel

Sistem Spindel seperti pada Gambar 2.5 adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola Radial dan Ring. Spindel terdiri dari beberapa penyalang (*feeder*) yang tegangannya diberikan

dari Gardu Induk dan tegangan tersebut berakhir pada sebuah Gardu Hubung (GH).



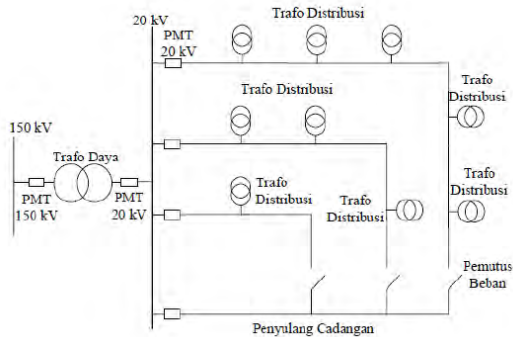
Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Spindel

Pada sebuah spindel bisaanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (*express*) yang akan dihubungkan melalui gardu hubung. Pola Spindel bisaanya digunakan pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah/saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM).

Namun pada pengoperasiannya, sistem Spindel berfungsi sebagai sistem Radial. Di dalam sebuah penyulang aktif terdiri dari gardu distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan kepada konsumen baik konsumen tegangan rendah (TR) atau tegangan menengah (TM).

2.1.1.5 Sistem Gugus atau Sistem Kluster

Konfigurasi Gugus seperti pada Gambar 2.6. banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat Saklar Pemutus Beban, dan penyulang cadangan.

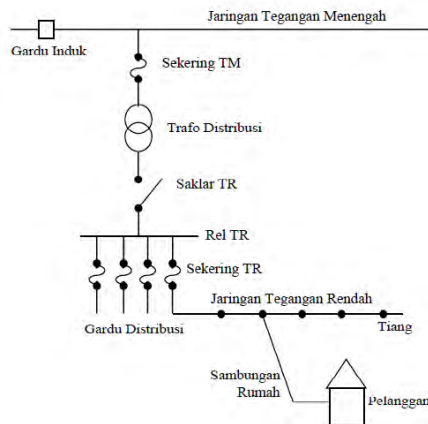


Gambar 2.6 Konfigurasi Sistem Kluster

Dimana penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai kekonsumen.

2.1.2 Jaringan Pada Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.7. merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.



Gambar 2.7 Hubungan Tegangan Menengah ke Tegangan Rendah dan Konsumen

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini

selain berfungsi menerima daya listrik dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. Mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan.

Jatuh tegangan pada sistem distribusi mencakup jatuh tegangan pada :

1. Penyulang Tegangan Menengah (TM)
2. Transformator Distribusi
3. Penyulang Jaringan Tegangan Rendah
4. Sambungan Rumah
5. Instalasi Rumah.

Jatuh tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan. Jatuh tegangan yang diijinkan tidak boleh lebih dari 5% ($\Delta V \leq 5\%$). Secara umum ΔV dibatasi sampai dengan 3,5%.

2.1.3 Komponen Sistem Distribusi

Dalam proses penyaluran tenaga listrik kepada konsumen, sistem distribusi memerlukan bermacam-macam komponen dengan kegunaanya masing-masing.

2.1.3.1 Gardu Distribusi/Gardu Tiang

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan ke konsumen atau untuk membagikan/mendistribusikan tenaga listrik pada beban/konsumen, baik konsumen tegangan menengah maupun konsumen tegangan rendah. Secara umum komponen utama gardu distribusi atau gardu tiang yaitu [2]:

- a. Transformator : Berfungsi sebagai trafo daya merubah tegangan menengah (20kV) menjadi tegangan rendah (380/220)Volt.
- b. *Fuse Cut Out* : Sebagai pengaman penyulang, bila terjadi gangguan di gardu (trafo) dan melokalisir gangguan ditrafo agar peralatan tersebut tidak rusak. FCO dipasang pada sisi tegangan menengah (20kV).
- c. Arrester : Sebagai pengaman trafo terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan switching.

- d. NH Fuse : Sebagai pengaman trafo terhadap arus lebih yang terpasang disisi tegangan rendah (220V), untuk melindungi trafo terhadap gangguan arus lebih yang disebabkan karena hubung singkat di jaringan tegangan rendah maupun karena beban lebih.
- e. Ground Arrester : Untuk menyalurkan arus ke tanah yang disebabkan oleh tegangan lebih karena sambaran petir dan switching.
- f. Grounding LV : Sebagai pengaman bila terjadi arus bocor yang mengalir di LV panel.

2.1.3.2 Konduktor Sistem Distribusi

Konduktor termasuk komponen utama dalam sistem distribusi tenaga listrik. Konduktor berperan menyalurkan arus dari satu bagian menuju bagian lain dan juga berfungsi menghubungkan bagian-bagian yang dirancang mempunyai tegangan level yang sama. Pemilihan jenis dan ukuran konduktor harus memenuhi syarat-syarat teknis dan juga ekonomis.[3]

Bahan konduktor yang paling umum digunakan adalah tembaga dan aluminium. Dilihat dari jenis isolasi yang digunakan, konduktor terdiri dari dua jenis, yaitu konduktor kawat telanjang dan konduktor berisolasi atau kabel. Kegunaan konduktor kawat telanjang yaitu sebagai berikut :

1. Menyalurkan energy listrik dari satu gardu distribusi ke distribusi yang lain.
2. Menyalurkan energy listrik dari gardu induk ke trafo distribusi.
3. Membagi penyaluran daya pada gardu induk dan panel.

Konduktor kabel digunakan pada jaringan distribusi terutama dikawasan perkotaan yang padat penduduk selain itu juga digunakan untuk menyalurkan energy listrik dari trafo daya ke panel control dan dari panel control ke jaringan distribusi hantaran udara.

Impedansi kawat penghantar AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*) tegangan 20 kV menurut SPLN 64 : 1985 adalah [4]:

Tabel 2.1 Impedansi Kawat penghantar AAAC

Luas Penampang (mm ²)	Jari-jari (mm)	Impedansi Urutan Postif dan Negatif (ohm/Km)	Impedansi Urutan Nol (ohm/Km)
16	22,563	2,0161 + j 0,4036	2,1641 + j 1,6911
25	28,203	1,2903 + j 0,3895	1,4384 + j 1,6770
35	33,371	0,9217 + j 0,3790	1,0697 + j 1,6665
50	39,886	0,6452 + j 0,3678	0,7932 + j 1,6553
70	47,193	0,4608 + j 0,3572	0,6088 + j 1,6447
95	54,979	0,3096 + j 0,3449	0,4876 + j 1,6324
120	61,791	0,2688 + j 0,3376	0,4168 + j 1,6324
150	69,084	0,2162 + j 0,3305	0,3631 + j 1,6180
185	76,722	0,1744 + j 0,3239	0,3224 + j 1,6114
240	87,386	0,1344 + j 0,3158	0,2824 + j 1,6034

2.1.3.3 Tiang Listrik

Tiang listrik merupakan salah satu komponen utama dari konstruksi jaringan distribusi dengan saluran udara. Pada jaringan distribusi tiang yang bisa digunakan adalah tiang beton. Tiang listrik harus kuat karena selain digunakan untuk meletakkan peralatan-peralatan pendukung jaringan distribusi tenaga listrik tegangan menengah. Penggunaan tiang listrik disesuaikan dengan kondisi lapangan.

Tiang listrik yang dipakai dalam distribusi tenaga listrik harus memiliki sifat-sifat antara lain :

- Kekuatan mekanik yang tinggi
- Perawatan yang mudah

- c. Mudah dalam pemasangan konduktor saluran dan perlengkapannya

2.1.3.4 Isolator

Isolator adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk mengisolasi konduktor atau penghantar dengan tiang listrik. Menurut fungsinya, isolator dapat ditinjau dari dua segi yaitu :

- a. Fungsi dari segi listrik : Untuk menyekat/mengisolasi antara kawat fasa dengan tanah dan kawat fasa lainnya.
- b. Fungsi dari segi mekanis : Menahan berat konduktor/kawat penghantar serta menahan adanya perubahan pada kawat penghantar akibat temperature dan angin.

Bahan yang digunakan untuk pembuatan isolator yang banyak digunakan pada sistem distribusi tenaga listrik adalah isolator dari bahan porselin/keramik dan isolator dari bahan gelas. Kekuatan porselin dengan ketebalan 1,5 mm dalam pengujian memiliki kekuatan 22 sampai 28 kVrms/mm. Kekuatan mekanis dengan diameter 2 cm sampai 3 cm mampu menahan gaya tekan 4,5 ton/cm².

Kegagalan kekuatan listrik sebuah isolator dapat terjadi dengan jalan menembus bahan dielektrik atau dengan jalan loncatan api (flash over) diudara sepanjang permukaan isolator. Kasus pertama dapat diatasi dengan cara memilih kualitas bahan isolator dan pengolahan/perawatan yang baik. Kasus kedua dapat diatasi dengan memperbaiki tipe atau konstruksi dari isolatornya. Pada umumnya semua konstruksi isolator direncanakan untuk tegangan tembus yang lebih tinggi dari tegangan flashover, sehingga bisaanya kekuatan listrik isolator dikarakteristikan oleh tegangan flashovernya.

Ada beberapa jenis konstruksi isolator dalam sistem distribusi, antara lain :

- a. Isolator gantung (*suspension type insulator*)
- b. Isolator jenis pasak (*pin type insulator*)
- c. Isolator batang panjang (*long rod type insulator*)
- d. Isolator jenis post saluran (*line post insulator*)

2.1.3.5 Pemutus Tenaga

Termasuk peralatan proteksi, yang berfungsi untuk memutus arus gangguan, dan memutus serta menghubungkan daya listrik. Menurut SPLN 108 : 1993, Pemutus Tenaga adalah

alat hubung mekanik yang dapat menutup, mengalirkan dan memutus arus dalam kondisi normal (saat tidak terjadi gangguan), dan juga menutup, mengalirkan arus selama waktu tertentu dan memutus arus secara otomatis saat terjadi gangguan (saat kondisi abnormal), seperti hubung singkat. Pemutus tenaga dapat digunakan untuk memutus arus, karena memiliki media pemadam busur api listrik didalamnya.[5]

2.1.3.6 Recloser/Penutup Balik Otomatis

Automatic circuit recloser didefinisikan sebagai peralatan yang mengontrol dirinya sendiri untuk secara otomatis membuka ataupun menutup rangkain berdasarkan urutan kerja membuka dan menutup diikuti oleh proses mengeset ulang , *hold closed* atau mengunci. *Automatic circuit recloser*, atau yang umum dikenal dengan *recloser*. Merupakan peralatan pemutus rangkaian yang umum digunakan pada jaringan distribusi, dimana recloser ini akan membatasi besarnya arus gangguan.

2.1.4 Gangguan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Keandalan sistem tenaga listrik sangat diperlukan dalam pendistribusian energi listrik. Keandalan ini menyatakan suatu kineja jaringan dalam proses penyaluran energi listrik dari sumber energi listrik kekonsumen. Agar energi listrik dapat tersalurkan kekonsumen dengan baik maka dipelukan kinerja jaringan yang baik pula. Namun pada kenyataannya terdapat banyak gangguan yang menghambat kinerja jaringan tersebut. Terlebih lagi jaringan yang digunakan untuk penyaluran energi listrik ini begitu panjang dan terletak dialam terbuka. Sedangkan untuk Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV itu sendiri merupakan jaringan yang langsung berhubungan dengan konsumen dan terletak di kondisi alam yang kompleks. Banyak faktor yang dapat menghambat kinerja SUTM ini yang disebut juga dengan gangguan.

Ada dua macam penyebab gangguan yang menghambat kinerja Saluran Udara Tegangan Menengah, yaitu gangguan dari dalam dan gangguan dari luar.

1. Penyebab gangguan dari dalam ini berasal dari dalam sistem itu sendiri, gangguan – gangguan tersebut seperti :
 - a. Tegangan lebih atau arus tidak normal
 - b. Pemasangan peralatan jaringan yang kurang baik
 - c. Penuaan, dan kerusakan peralatan

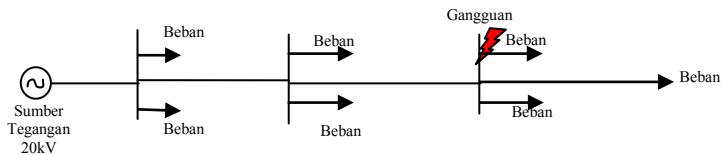
- d. Beban lebih.
2. Sedangkan untuk gangguan dari luar bisaanya disebabkan oleh:
 - a. Angin
 - b. Surja petir
 - c. Binatang
 - d. Pohon
 - e. Manusia, dan benda benda asing lainnya.

Pada Saluran udara tegangan menengah terdapat gagguan yang sering terjadi diantaranya berupa :

1. Gangguan fasa
2. Gangguan tanah
3. Gangguan konduktor putus

2.2 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri yaitu gangguan hubung singkat tiga fasa, sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu.



Gambar 2.8 Gangguan Pada Jaringan Radial

Sebagian besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetri. Gangguan tak simetri ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah. Gangguan dapat diperkecil dengan cara pemeliharaannya.

Adanya gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan rusaknya peralatan listrik, berkurangnya stabilitas daya, dan terhentinya kontinuitas daya akibat membukanya circuit breaker.

2.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan praktis untuk menghitung besar arus hubung singkat dalam sistem distribusi dapat dilakukan sebagai berikut :

a. Hubung Singkat Tiga Fasa

Kondisi saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa (Turan Gonen, 1986: 284) [6]:

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$V_a = V_b = V_c$$

Karena sistemnya seimbang maka urutan negatif dan urutan nol tidak ada, sehingga diperoleh:

$$V_a = V_f - I_{a1}Z_{a1} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$I_{a1} = I_a = I_f = \frac{V_f}{Z} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

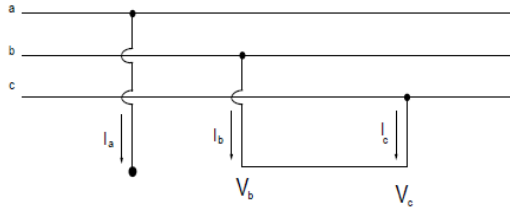
Hubung singkat ini melibatkan ketiga fasa. Arus hubung singkat tiga fasa diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_f 3\phi = \frac{E_{ph}}{Z} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Untuk gangguan tiga fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif, nilai ekuivalen Z_1 , dan tegangannya adalah E fasa (line to netral).

b. Hubung Singkat Antar Fasa

Hubung singkat ini terjadi antara dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Arus hubung singkat antar fasa diberikan oleh persamaan berikut :



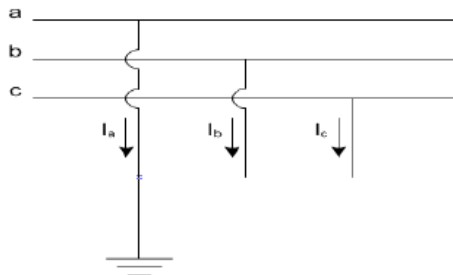
Gambar 2.9 Hubung Singkat Antar Fasa Langsung

$$I_f 2\phi = \frac{E_{ph} \times \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_f 3\phi \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Untuk gangguan fasa ke fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif dan urutan negatif, nilai ekivalen $Z_1 + Z_2$, dan tegangannya adalah E fasa-fasa.

c. Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Untuk gangguan ini dianggap fasa *a* mengalami gangguan. Gangguan ini dapat digambarkan pada gambar di bawah:



Gambar 2.10 Gambar Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol (Z_0), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan.

$$I_f 1\phi = \frac{E_{ph} \times 3}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

2.4 Kedip Tegangan

Didefinisikan sebagai fenomena penurunan magnitude tegangan efektif terhadap harga nominal selama interval waktu yang telah di tentukan.

Menurut surat edaran direksi No.12E/012/DIR/2000 tentang lama kedip disisi suplai :

- a. Sub sistem 500kV \leq 110 milidetik
- b. Sub sistem 150kV \leq 140 milidetik
- c. Sub sistem 70kV \leq 170 milidetik
- d. Sub sistem 20kV \leq 1000 milidetik

Tegangan kedip bisa terjadi karena adanya gangguan di sistem, dapat juga di sebabkan karena starting motor-motor besar, tegangan kedip memiliki dua karakteristik yaitu kedalaman dan durasi.

Kedalaman atau magnitude dari tegangan kedip tidak dapat dikontrol. Karakteristik yang kedua adalah durasi, durasi dari tegangan kedip dapat dikontrol menggunakan rele pengaman yang canggih dengan penggunaan yang tepat.

Menurut *IEEE std. 1159-1995, IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*, kedip tegangan atau *voltage sag/dip* adalah suatu penurunan nilai rms tegangan yang bernilai antara 0,1 sampai 0,9 pu dari tegangan normal dengan durasi 0,5 *cycle* (10 rms) sampai 1 menit.

Definisi *ANSI std. 1100-1992, voltage sag/dip* adalah pengurangan besarnya tegangan rms AC, pada frekuensi daya, dengan durasi dari 0,5 *cycle* sampai beberapa detik.

1. Tegangan dapat turun dibawah level normal selama beberapa *cycle* dan dapat mempengaruhi beban kritis yang dapat menyebabkan trip.
2. Peralatan yang di control secara elektronik, tegangan 20% dibawah normal akan menyebabkan mati.

Definisi IEC 61000-2-8 2000 (*international electrothecnic commission*), tegangan kedip adalah pengurangan tegangan secara mendadak, terutama pada sistem suplai kelistrikan dibawah ambang kedip yang terjadi dengan interval pemulihan yang singkat.

Mengenai kedalaman kedip tegangan tidak dijamin oleh PLN, karena kedalaman kedip tergantung dari jarak lokasi gangguan penyebab kedip, kekuatan (kapasitas) pasokan daya, hubungan trafo, jenis gangguan, sistem pentanahan, tegangan pragangguan, dll. Sedangkan mengenai durasi terjadinya tegangan kedip yang

dijamin oleh PT.PLN persero, diatur dalam edaran direksi PLN No. 12.E/012/DIR/ 2000 tanggal 25 April 2000.

Lamanya tegangan kedip disisi pemasok dikaitkan dengan bekerjanya proteksi utama jaringan dan proteksi cadangan. Kedip tegnagn didefinisikan sebagai fenomena penurunan amplitude tegangan terhadap harga normalnya selama interval waktu t ($0,5 - 30 \text{ cycle}$), sebagai akibat bekerjanya peralatan pengaman karena adanya gangguan yang terjadi baik pada jaringan transmisi/distribusi maupun pada instalasi konsumen/industri. Dengan kata lain gangguan tegangan kedip adalah perbedaan nilai efektif tegangan dengan tegangan nominalnya selama selang waktu tertentu. Perbedaan nilai tegangan tersebut berkisar antara 10%-100% tegangan nominalnya, dan lamanya (interval waktu) berkisar antara 10 milidetik sampai dengan ratusan milidetik. Gangguan tegangan kedip akan hilang dengan segera setelah bekerjanya pemutus tegangan (PMT). Kedalaman kedip tergantung dari lokasi gangguan, impedansi sistem dan impedansi gangguan, hubungan trafo, sistem grounding dan tegnagan prefault.

Sedangkan yang disebut dengan pemadaman sesaat adalah gangguan tegangan kedip 100% dari tegangan nominal, dan umumnya terjaadi antara interval waktu antara 1 detik sampai 1 menit. Fluktuasi tegangan yang mengakibatkan terjadinya kedip tegangan akan menjadi masalah serius bila tingkat fluktuasinya 0,3-1%.

Dalam penyediaan sistem tenaga listrik secara umum, *power quality* dapat dikelompokan menjaid dua bagian, pertama yang disebabkan oleh beban, sehingga dibatasi oleh PLN, seperti *flicker*, *harmonic* dan *unbalance voltage*. Sedangkan yang kedua adalah yang dijamin oleh PLN seperti *voltage dip*, frekuensi dan level tegangan. *Flicker* atau kelip merupakan depresi hubungan singkat dengan batasan $\leq 2,5\%$ untuk sistem 50 kV, untuk 70 kV batasanya $\leq 2,75\%$ dan untuk sistem 20kV batasannya $\leq 3\%$.

Unbalance voltage dinyatakan sebagai perbandingan komponen tegangan urutan negatif terhadap tegangan urutan positifnya yang besarnya $V_2/V_1 \leq 2\%$, sedangkan harmonisa tegangan atau arus komponen dasarnya, dan dinyatakan dalam bentuk prosennya, bisanya berupa cacat harmonisa total (*Total Harmonic Distortion*). Bisaanya untuk sistem 150kV diijinkan $\leq 1,5\%$, untuk sistem 70kV \leq tegangan kerja sistem $\leq 150\text{kV}$, diijinkan sampai sekitar 3% dan dibawah 70kV diperbolehkan melebihi 5%.

Selain batasan diatas, PLN juga memberikan jaminan mengenai *power quality* ke konsumen yaitu untuk frekuensi dengan batasan 50,5 Hz - 49,5 Hz, sedangkan untuk tegangan dengan batasan +10% sampai -5% dari tegangan kerja.

2.4.1 Penyebab Tegangan Kedip

Beberapa kejadian yang dapat menyebabkan tegangan kedip pada sistem kelistrikan adalah :

- Gangguan hubung singkat, baik yang terjadi di instalasi itu sendiri, ataupun yang terjadi di penyulang lain.
- Surja alih hubung akibat pengoperasian pemutus tenaga di saluran tenaga tegangan tinggi atau sistem distribusi.
- Perubahan beban yang cukup besar secara tiba-tiba.
- Karakteristik pembebanan konsumen, seperti : s tarding motor kapasitas besar, mesin pemotong logam berkapasitas besar. Ketika starting motor induksi akan menarik arus sebesar enam sampai sepuluh kali arus beban penuh. Arus yang ditarik ini akan menyebabkan drop tegangan ketika melalui impedansi sistem. Jika arus sangat besar maka tegangan kedip yang terjadi akan sangat signifikan.
- Energizing Transformator.*

2.4.2 Besaran Tegangana Kedip/ Voltage Dip Pada Sistem Radial

Besaran kedip digunakan sebagai fungsi jarak terhadap gangguan dinyatakan sebagai persamaan :

$$V_{sag} = \frac{Z_{line}}{Z_{sumber} + Z_{line}} V_{bus} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

Z_{line} adalah impedansi dari panjang saluran/jaringan distribusi dari sumber samapai ke titik gangguan, Z_{sumber} adalah impedansi sumber jaringan sistem ditribusi dimana pada penyulang ini sumber berasal dari trafo gardu induk yang mempunyai kapasitas 50MVA.

2.5 Distributed Generation (DG)

DG atau pembangkit distribusi adalah unit-unit pembangkit kecil yang terhubung dengan sistem distribusi yang berfungsi sebagai :

1. Meningkatkan dan menstabilkan kualitas energi listrik

2. Meningkatkan ketersediaan dan keandalan energi listrik
3. Mengurangi arus beban penuh.
4. Menghemat biaya energi
5. Dapat menjual energi listrik ke pengguna lain
6. Kompensasi daya reaktif

DG adalah sumber yang hanya mempunyai ukuran kapasitas terbatas, bisaanya ≥ 0 sampai 5 MW, modular teknologi pembangkitan tenaga sangat dibutuhkan jaringan distribusi karena sistem tersebut mampu mengurangi losses sistem, memperbaiki kualitas tenaga dan untuk keandalan tenaga listrik.

Namun akan timbul banyak permasalahan ketika suatu unit DG dihubungkan ke sistem jaringan listrik lain misal ke jaringan distribusi PLN 20 kV. Sistem tenaga listrik dimasa depan harus serba guna dan fleksibel sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat bebas ditransmisikan, didistribusikan dan dikonsumsi.

Masalah utama yang berkaitan dengan interkoneksi DG pada jaringan distribusi yaitu dampak kualitas daya listrik pada saluran tenaga listrik ke konsumen.

Adapun yang berhubungan kualitas daya yaitu meliputi

1. Pengaturan tegangan
2. *Flicker*
3. Ketidak seimbangan tegangan
4. Harmonisa
5. Masuknya arus DC

Pada DG tidak ada ukuran kapasitas dan tegangan yang pasti. IEEE mengeluarkan standard (IEEE P1547-D11-2003) untuk dipertimbangkan dipasang di gardu induk untuk memperbaiki level distribusi, yaitu sebagai *Distributed Resources* (DR), *encompasses distributed generation, backup generation, energy storage, demand side management (DSM) technologies*.

DG dapat digunakan untuk memperbaiki harga dan efisiensi, sehingga sangat mempengaruhi performa dari pusat tenaga listrik yang sangat signifikan ketika membangun atau menambah jaringan distribusi dengan ukuran yang besar. Pada waktu yang sama, ada perubahan yang sangat signifikan ketika membangun atau menambah jaringan distribusi dengan ukuran yang besar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PENERAPAN SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER TIPE AKTIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI

Tugas akhir ini dilakukan untuk menganalisa dampak dari penambahan *Superconducting Fault Current Limiter Active Type* pada jaringan distribusi runkut 20 kV saat terjadi gangguan hubung singkat dan saat terjadi tegangan kedip.

3.1 Data Sistem Jaringan Distribusi Rungkut

Plant yang digunakan adalah Jaringan Distribusi Rungkut penyulang Bandilan dengan tegangan 20 kV dengan tipe jaringan distribusi adalah tipe radial dengan diameter kawat jaringan 150 mm². Penyulang Bandilan adalah outgoing dari Trafo 5 Gardu Induk Rungkut. Trafo 5 Gardu Induk Rungkut merupakan trafo dengan hubungan (YY) yang mempunyai belitan delta didalamnya, dan menggunakan sistem pentanahan dengan tahanan resistansi.

Berikut adalah data Trafo 5 Gardu Induk Rungkut :

Kapasitas : 50 MVA
 kV Primer : 150 kV
 kV Sekunder : 20 kV
 Vektor Ground : Yyn0+d
 Reaktansi : 12,266%
 Resistansi Pentanahan : 500 ohm

Berikut adalah data saluran sistem distribusi runkut penyulang bandilan serta data beban .

Tabel 3.1 Data Jaringan Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

No.	Bus		Tegangan (kV)	Z ₁ dan Z ₂ /KM		Z ₀ /KM		Panjang jaringan
				<i>r</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>x</i>	
1	0	1	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	232
2	0	2	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	336
3	0	3	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	431
4	0	4	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	481
5	0	5	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1016
6	0	6	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1066

7	0	7	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1116
8	0	8	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1216
9	0	9	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1266
10	0	10	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1316
11	0	11	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1416
12	0	12	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	806
13	0	13	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	969
14	0	14	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1167
15	0	15	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1216
16	0	16	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1265
17	0	17	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1339
18	0	18	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1390
19	0	19	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1390
20	0	20	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1430
21	0	21	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1450
22	0	22	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1522
23	0	23	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1558
24	0	24	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1656
25	0	25	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1982
26	0	26	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2292
27	0	27	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2214
28	0	28	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2316
29	0	29	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2204
30	0	30	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2229
31	0	31	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1946
32	0	32	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2024
33	0	33	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2050
34	0	34	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2166
35	0	35	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2207
36	0	36	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2252

37	0	37	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2282
38	0	38	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2315
39	0	39	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2387
40	0	40	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2688
41	0	41	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2723
42	0	42	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2235
43	0	43	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2265
44	0	44	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2265
45	0	45	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2391
46	0	46	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2497
47	0	47	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2857
48	0	48	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2902
49	0	49	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2467
50	0	50	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2563
51	0	51	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2885

Tabel 3.2 Data Beban Jaringan Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

No.	Bus	Beban kVA
1	1	50
2	2	160
3	3	160
4	4	160
5	5	100
6	6	250
7	7	200
8	8	160
9	9	100
10	10	100
11	11	100

No.	Bus	Beban kVA
27	27	200
28	28	200
29	29	100
30	30	690
31	31	50
32	32	200
33	33	200
34	34	200
35	35	100
36	36	240
37	37	100

12	12	160
13	13	50
14	14	200
15	15	200
16	16	50
17	17	160
18	18	200
19	19	200
20	20	200
21	21	100
22	22	100
23	23	160
24	24	200
25	25	50
26	26	160

38	38	200
39	39	50
40	40	100
41	41	200
42	42	160
43	43	250
44	44	160
45	45	520
46	46	150
47	47	250
48	48	160
49	49	200
50	50	865
51	51	200

3.2 *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)*

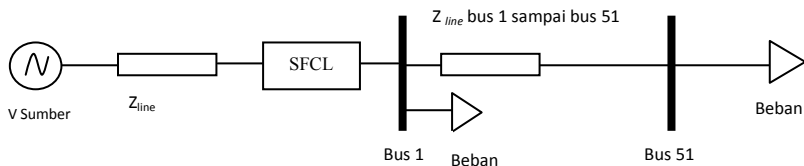
Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi dan meningkatnya jumlah penduduk, maka kebutuhan akan tenaga listrik semakin besar, baik di negara yang sedang berkembang maupun di negara maju. Hal ini ditunjukkan dengan terus dibangunnya jaringan-jaringan listrik baik di kota-kota besar maupun di pelosok pedesaan. Untuk mengurangi besarnya arus gangguan akibat hubungan singkat pada jaringan listrik, maka dikembangkan suatu alat pengaman jaringan listrik dengan memanfaatkan fenomena superkonduktivitas yang disebut dengan *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)*. Di luar negeri, beberapa prototipe *SFCL* telah berhasil diuji coba pada jaringan transmisi yang menyalurkan daya listrik hingga 100 kVA, hasilnya terbukti *feasible* secara teknis.

Pembatas arus gangguan dari bahan superkonduktor atau biasa disebut *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* merupakan suatu komponen pelindung yang sangat penting dalam sistem jaringan listrik, memanfaatkan karakteristik non-linier yang ditampilkan oleh bahan ketika terjadi transisi fasa dari keadaan tidak resistif ke keadaan resistif. Transisi fasa superkonduktor

terjadi akibat arus yang mengalir pada bahan tersebut meningkat sehingga melebihi arus kritis bahan tersebut. Penyebab peningkatan arus tersebut adalah karena telah terjadi hubungan singkat pada jaringan. SFCL dimanfaatkan untuk mengamankan sistem pembangkitan (*generation*), transmisi dan distribusi energi listrik. SFCL berperan seperti sebuah saklar otomatis yang beroperasi sangat cepat tanpa suatu alat kontrol dan mampu mereduksi arus transien yang besar. *Voltage sag*/kedip tegangan sangat penting bagi keandalan dari sistem tenaga listrik. *Voltage sag* yang terjadi pada saat gangguan hubung singkat sangat erat dengan arus gangguan hubung singkat. Karena itu untuk mengatasi *voltage sag* dan meningkatkan kualitas daya listrik dilakukan dengan memasang peralatan yang dapat membatasi arus gangguan yang di pasang diawal jaringan distribusi salah satunya adalah SFCL.

3.2.1 Penerapan *Superconducting Fault Current Limiter Active Type* (SFCL Tipe Aktif)

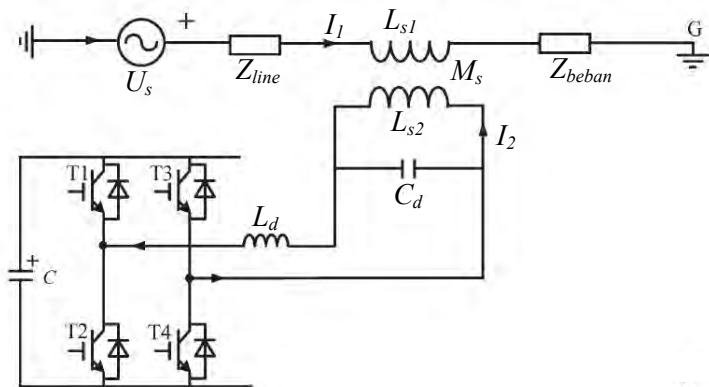
Superconducting fault current limiter Active Type (SFCL Tipe Aktif) telah menjadi daya aparatur yang paling menjanjikan untuk menekan besarnya arus hubung singkat. SFCL tipe aktif digunakan untuk mengurangi arus gangguan pada sistem tenaga listrik [7]. SFCL tipe aktif terdiri dari sebuah superkonduktor transformator inti udara dan konverter PWM. Medan magnet dalam inti udara dapat dikontrol dengan menyesuaikan arus konverter output, dan kemudian impedansi SFCL tipe aktif dapat diatur untuk membatasi arus gangguan dan juga memungkinkan untuk penekanan tegangan lebih [8]. Gambar 3.1 merupakan single line diagram pemasangan SFCL tipe aktif pada jaringan distribusi



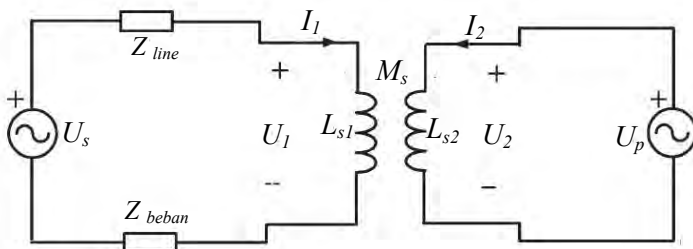
Gambar 3.1 Aplikasi SFCL tipe aktif di jaringan distribusi

Gambar 3.2 merupakan struktur rangkaian pengganti satu fasa yang diberi SFCL tipe aktif, yang mana SFCL tersebut terdiri

dari *air-core superconducting transformer* dan *voltage-type PWM converter*[8]. L_{s1} dan L_{s2} adalah self-inductance dari dua buah belitan superconducting, dan M_s adalah mutual inductance. Z_{line} adalah impedansi jaringan dari sumber sampai SFCL dan Z_{beban} adalah impedansi beban. L_d dan C_d digunakan untuk filter *harmonic* orde tinggi yang dikarenakan oleh converter. Karena kemampuan tegangan jenis converter mengendalikan pertukaran listrik diimplementasikan dengan mengatur tegangan sisi AC, konverter dapat dianggap sebagai pengatur sumber tegangan U_p . Dengan mengabaikan *Losses transformer*, sehingga rangkaian ekuivalen SFCL tipe aktif dapat ditampilkan dengan gambar 3.3.[8]



Gambar 3.2 Rangkaian pengganti satu fasa SFCL tipe aktif



Gambar 3.3 Rangkaian ekuivalen SFCL tipe aktif

Dalam keadaan normal (tanpa gangguan), arus injeksi I_2 di belitan sekunder (L_{s2}) transformer akan di control nilainya, dimana medan magnet di *air-core* bisa dikompensasikan ke nol, sehingga SFCL tidak akan mempengaruhi jaringan utama (jaringan distribusi). Ketika gangguan terdeteksi, arus injeksi I_2 akan mengatur amplitude atau sudut fasanya, untuk mengontrol tegangan utama superkonduktor transformator yang di seri dengan jaringan utama (jaringan distribusi), dan selanjutnya gangguan bisa ditekan/dikurangi sampai batas tertentu.

Dibawah ini, penjelasan cara mengatur spesifik SFCL . Dalam keadaan normal, ada dua persamaan dapat dicapai.[8]

$$U_s = I_1(Z_{line} + Z_{beban}) + j\omega L_{s1} I_1 - j\omega M_s I_2 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

Saat jaringan tidak dipasang SFCL maka nilai U_s adalah :

$$U_s = I_1(Z_{line} + Z_{beban}) \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

$$U_p = j\omega M_s I_1 - j\omega L_{s2} I_2 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

Mengontrol I_2 sehingga $j\omega L_{s1} I_1 - j\omega M_s I_2 = 0$ dan tegangan primer U_1 pada belitan primer SFCL akan diatur menjadi nol. Dengan demikian Z_{SFCL} akan sama dengan nol ($Z_{SFCL} = \frac{U_1}{I_1}$) . Dan I_2 bisa di seting dengan cara :

$$I_2 = U_s \sqrt{L_{s1}/L_{s2}} / (Z_{line} + Z_{beban})k \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

$$k = M_s / \sqrt{L_{s1}L_{s2}} \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

diamana k adalah koefisien kopling.

Saat terjadi gangguan Z_{beban} mengalami hubung singkat, sehinggan arus pada jaringan distribusi I_1 nilainya akan naik menjadi I_{1f} , besarnya kenaikan arus I_{1f} didapat dari arus hubung singkat maksimum, yang mana arus hubung singkat maksimum di dapat dari arus hubung singkat tiga fasa. Persamaan (2.3) digunakan untuk mencari arus hubung singkat maksimum . Karena I_1 naik maka tegangan pada belitan primer SFCL U_1 juga akan naik menjadi U_{1f} .

$$U_{1f} = j\omega L_{s1} I_{1f} - j\omega M_s I_2 \quad \dots\dots(3.6)$$

Z_{SFCL} bisa di control :

$$Z_{SFCL} = \frac{U_{1f}}{I_{1f}} = j\omega L_{s1} - \frac{j\omega M_s I_2 (Z_{line} + j\omega L_{s1})}{U_s + j\omega M_s I_2} \quad \dots\dots(3.7)$$

Menurut perbedaan dalam tujuan mengatur I_2 , ada tiga mode operasi:

- 1) Membuat I_2 tetap dalam keadaan semula, sehingga Z_{SFCL} bisa dicari dengan :

$$Z_{SFCL} = Z_{beban} (j\omega L_{s1}) / (Z_{line} + Z_{beban} + j\omega L_{s1}) \quad \dots\dots(3.8)$$

- 2) Mengontrol I_2 ke nol, sehingga Z_{SFCL} bisa dicari dengan :

$$Z_{SFCL} = j\omega L_{s1} \quad \dots\dots(3.9)$$

- 3) Meregulasi sudut fasa I_2 untuk membuat perbedaan sudut antara U_s dengan $j\omega M_s I_2$ menjadi 180° .
Dengan menseting :

$j\omega M_s I_2 = (-c) \times U_s$, sehingga :

$$c = - \frac{j\omega M_s I_2}{U_s} \quad \dots\dots(3.10)$$

sehingga Z_{SFCL} dapat dicari dengan cara :

$$Z_{SFCL} = c \times Z_{line} / (1 - c) + j\omega L_{s1} / (1 - c) \quad \dots\dots(3.11)$$

Pada tugas akhir ini parameter-parameter SFCL tipe aktif diambil dari referensi [8]

Tabel 3.3 Parameter SFCL Tipe Aktif

SFCL Tipe aktif	
<i>Primary Inductance</i> (L_{s1})	50 mH
<i>Secondary Inductance</i> (L_{s2})	30 mH
<i>Mutual Inductance</i> (M_s)	32,9 mH

3.2.2 Penerapan SFCL tipe Aktif Untuk Mereduksi Arus Hubung Singkat

Perhitungan praktis untuk menghitung besar arus hubung singkat dalam sistem distribusi dapat dilakukan sebagai berikut :

a. Hubung Singkat Tiga Fasa

Hubung singkat ini melibatkan ketiga fasa. Untuk menghitung arus hubung singkat tiga fasa pada jaringan distribusi yang telah dipasang SFCL diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_f 3\phi = \frac{E_{ph}}{Z + Z_{SFCL}} \dots\dots\dots(3.12)$$

Untuk mereduksi gangguan tiga fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif, nilai ekivalen Z_1 dengan menambahkan nilai Impedansi reduksi (Z_{SFCL}) , dan tegangannya adalah E fasa (*line to netral*).

b. Hubung Singkat Antar Fasa

Hubung singkat ini terjadi antara dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Untuk menghitung arus hubung singkat antar fasa pada jaringan distribusi yang telah dipasang SFCL diberikan oleh persamaan berikut:

$$I_f 2\phi = \frac{E_{ph} \times \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2 + Z_{SFCL}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_f 3\phi \dots\dots(3.13)$$

Untuk gangguan fasa ke fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif dan urutan negatif, nilai ekivalen $Z_1 + Z_2$ dan dengan menambahkan nilai Impedansi reduksi (Z_{SFCL}).

c. Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol (Z_0), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Untuk menghitung arus hubung singkat satu fasa ketanah pada jaringan distribusi yang telah dipasang SFCL diberikan oleh persamaan berikut.

$$I_f 1\phi = \frac{E_{ph} \times 3}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_{SFCL}} \quad \dots\dots(3.14)$$

3.2.3 Penerapan SFCL tipe Aktif Pada Tegangan Kedip

Jika SFCL dipasang di jaringan maka tegangan Bus ketika terjadi gangguan bisa dicari dengan cara [7] :

$$V_{sag} = \frac{Z_{line} + Z_{SFCL}}{Z_{sumber} + Z_{line} + Z_{SFCL}} V_{bus} \quad \dots\dots(3.15)$$

Z_{line} adalah impedansi dari panjang saluran/jaringan distribusi dari sumber samapai ke titik gangguan, Z_{sumber} adalah impedansi sumber jaringan sistem ditribusi dimana pada penyulang ini sumber berasal dari trafo gardu induk yang mempunyai kapasitas 50MVA.

BAB 4

PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1 Analisa Kerja *Superconducting Fault Current Limiter Active Type* Saat Kondisi Normal

Dalam keadaan normal diharapkan SFCL tidak mempengaruhi jaringan utama/distribusi. Saat keadaan normal (tanpa gangguan), arus injeksi di belitan sekunder transformator akan di kontrol nilainya, dimana medan magnet di *air-core* bisa dikompensasikan ke nol. Cara mengontrol arus injeksi bisa didapatkan dari persamaan (3.4).

Data yang dimiliki penyulang Bandilan di tunjukan pada tabel 3.1. dan tabel 3.2, Z_l adalah impedansi kawat jaringan urutan positif, Z_2 adalah impedansi kawat jaringan urutan negatif dan Z_0 adalah impedansi urutan nol, r adalah resistansi kawat jaringan dan x adalah reaktansi kawat jaringan. Untuk parameter SFCL ditunjukan pada tabel 3.3. Pemasangan SFCL sendiri dipasang sebelum bus 1 seperti pada gambar 3.1

Arus injeksi (I_2) yang diatur untuk mengontrol SFCL adalah sebesar :

$$I_2 = U_s \sqrt{L_{s1}/L_{s2}} / (Z_{line} + Z_{beban}) k$$

Nilai k adalah koefisien kopling yang didapat dari persamaan (3.5)

$$\begin{aligned} k &= M_s / \sqrt{L_{s1} L_{s2}} \\ &= (32,9 \times 10^{-3}) / \sqrt{(50 \times 10^{-3})(30 \times 10^{-3})} \\ &= 0,8495 \end{aligned}$$

Sehingga nilai I_2 adalah :

$$\begin{aligned} I_2 &= (20000/\sqrt{3}) \sqrt{\frac{(50 \times 10^{-3})}{(30 \times 10^{-3})}} / (0,0916 + 49,0196) 0,8495 \\ &= 357,3244 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

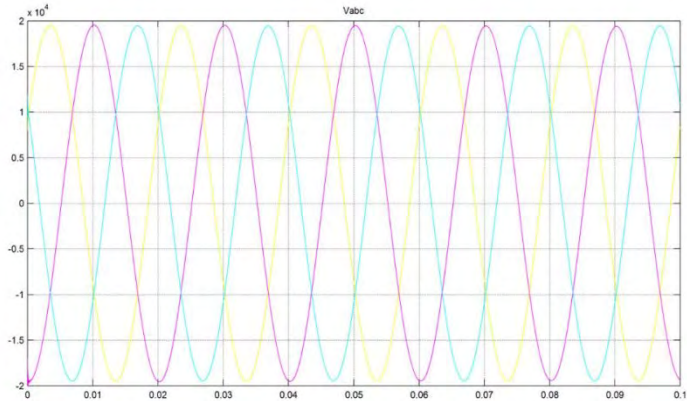
Untuk mencari I_1 didapat dari persamaan (3.2)

$$\begin{aligned} U_s &= I_1 (Z_{line} + Z_{beban}), \text{ sehingga} \\ I_1 &= U_s / (Z_{line} + Z_{beban}) \\ I_1 &= (20000/\sqrt{3}) / (0,0916 + 49,0196) \\ &= 235,1194 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

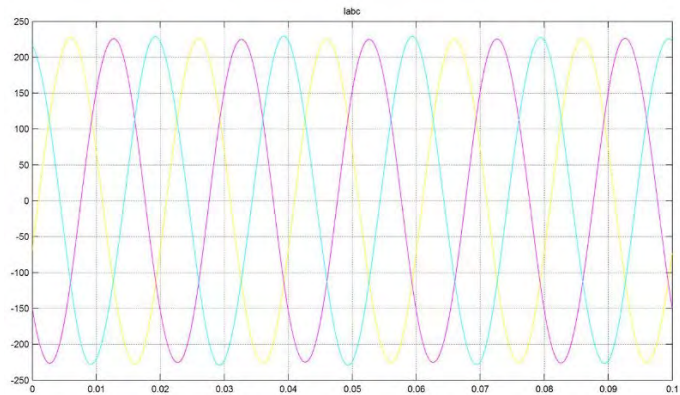
Tujuan dari mengontrol I_2 adalah untuk mengontrol tegangan di belitan primer U_1 SFCL agar nilainya nol.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= j\omega L_{s1} I_1 - j\omega M_s I_2 \\
 &= (15,7080 \times 235,1194) - (10,3358 \times 357,3244) = 0 \text{ volt} \\
 Z_{SFCL} \text{ saat keadaan normal adalah :} \\
 Z_{SFCL} &= \frac{U_1}{I_1} = \frac{0}{235.1194} = 0 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

Sehingga SFCL tidak mempengaruhi I_1 yang lewat pada saat keadaan normal.



Gambar 4.1 Gelombang Tegangan Saat Keadaan Normal



Gambar 4.2 Gelombang Arus Saat Keadaan Normal

4.2 Analisis Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

PT. PLN APJ Surabaya Selatan memiliki konfigurasi jaringan radial. Pada penelitian ini digunakan sistem distribusi Rungkut penyulang Bandilan. Perhitungan hubung singkat dilakukan menggunakan program *Matlab*.

4.2.1 Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

Perhitungan arus hubung singkat dilakukan dari gangguan yang terjadi dibus 1 sampai bus 51, untuk mencari besarnya arus hubung singkat bisa menggunakan persamaan (2.3) untuk gangguan 3 fasa, persamaan (2.4) untuk gangguan dua fasa dan persamaan (2.5) untuk gangguan satu fasa ketanah. Perhitungan arus hubung singkat dilakukan dari hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah. Hasil Perhitungan hubung singkat di tunjukan pada table 4.1.

Pada analisis tugas akhir ini, akan di lakukan perhitungan besarnya arus hubung singkat apabila dilakukan penambahan SFCL tipe aktif.

Saat gangguan terjadi maka nilai arus I_1 akan naik menjadi I_{If} , hasilnya ada pada tabel 4.1, nilai I_{If} adalah arus hubung singkat maksimum, sehingga nilai U_1 juga naik menjadi U_{If} . Untuk mencari besarnya nilai U_{If} digunakan persamaan (3.6).

$$\begin{aligned} U_{If} &= j\omega L_{s1} I_{If} - j\omega M_s I_2 \\ &= (15,7080 \times 10902,18) - (10,3358 \times 357,3244) \\ &= 167558,2099 \text{ volt} \end{aligned}$$

Pada saat terjadi gangguan tegangan pada belitan primer SFCL tidak lagi nol, dan SFCL akan menaikan nilai impedansi yang ada di belitan primer. Untuk mengontrol besarnya nilai Z_{SFCL} saat terjadi gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi d igunakan persamaan (3.7), dan dalam mengatur I_2 terdapat tiga mode operasi dengan persamaan untuk mode 1 digunakan persamaan (3.8), mode 2 digunakan persamaan (3.9) dan mode 3 di gunkan persamaan (3.10), besarnya Z_{SFCL} bisa dicari dengan menggunakan mode pertama .

Mode pertama membuat nilai I_2 tetap, sehingga nilai Z_{SFCL} saat terjadi gangguan adalah :

$$Z_{SFCL} = 49,0196 (15,7080) / (0,0916 + 49,0196 + 15,7080) \\ = 11,8792 \text{ ohm}$$

Perhitungan arus hubung singkat dengan penambahan SFCL tipe aktif pada jaringan distribusi bandilan dilakukan dari lokasi gangguan terjadi dibus 1 sampai bus 51, untuk mencari besarnya arus hubung singkat bisa menggunakan persamaan (3.12) untuk hubung singkat 3 fasa, persamaan (3.13) untuk hubung singkat 2 fasa dan persamaan (3.14) untuk hubung singkat 1 fasa ke tanah . Hasil Perhitungan hubung singkat di tunjukan pada table 4.1.

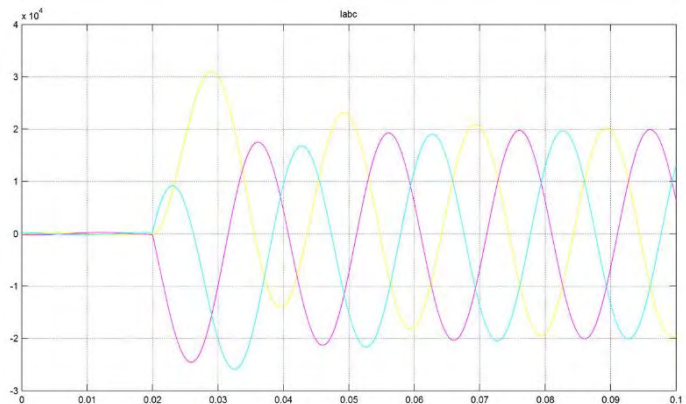
Tabel 4.1 Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Bandilan

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Arus Hubung Singkat					
		3 Fasa (A)		2 Fasa (A)		1 Fasa (A)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	10902.18	892.47	9441.29	772.88	23.0601	22.8792
2	2	10547.69	890.02	9134.30	770.75	23.0584	22.8775
3	3	10240.48	887.77	8868.26	768.81	23.0569	22.8760
4	4	10084.85	886.58	8733.48	767.78	23.0561	22.8752
5	5	8647.75	873.82	7488.95	756.73	23.0472	22.8665
6	6	8532.08	872.62	7388.78	755.69	23.0464	22.8657
7	7	8419.19	871.43	7291.02	754.66	23.0455	22.8648
8	8	8201.39	869.04	7102.40	752.59	23.0438	22.8632
9	9	8096.31	867.85	7011.41	751.55	23.0430	22.8623
10	10	7993.68	866.65	6922.52	750.52	23.0422	22.8615
11	11	7795.44	864.27	6750.85	748.46	23.0405	22.8599
12	12	9165.93	878.84	7937.69	761.07	23.0507	22.8699
13	13	8759.08	874.94	7585.37	757.70	23.0480	22.8673

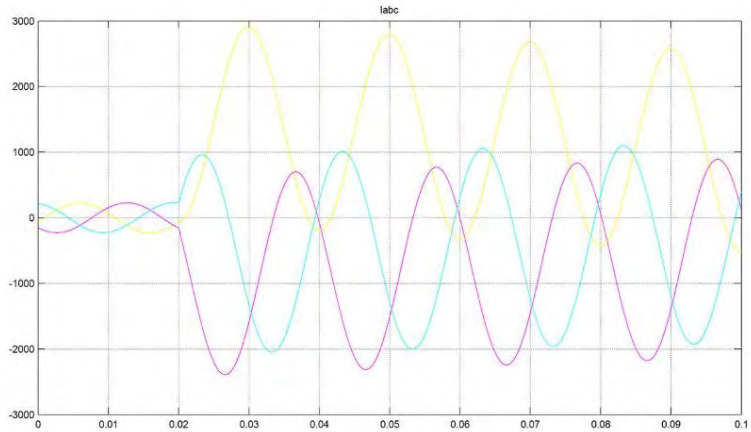
14	14	8306.81	870.21	7193.70	753.60	23.0447	22.8640
15	15	8201.39	869.04	7102.40	752.59	23.0438	22.8632
16	16	8098.39	867.87	7013.20	751.57	23.0430	22.8624
17	17	7947.27	866.10	6882.33	750.05	23.0418	22.8611
18	18	7846.10	864.89	6794.73	748.99	23.0409	22.8603
19	19	7846.10	864.89	6794.73	748.99	23.0409	22.8603
20	20	7768.41	863.94	6727.44	748.17	23.0402	22.8596
21	21	7730.10	863.46	6694.26	747.76	23.0399	22.8593
22	22	7595.02	861.75	6577.28	746.27	23.0387	22.8581
23	23	7529.11	860.89	6520.21	745.53	23.0381	22.8575
24	24	7354.97	858.57	6369.41	743.52	23.0364	22.8558
25	25	6826.45	850.88	5911.70	736.86	23.0308	22.8504
26	26	6386.55	843.64	5530.75	730.59	23.0255	22.8451
27	27	6492.08	845.45	5622.14	732.16	23.0268	22.8464
28	28	6354.73	843.08	5503.20	730.11	23.0251	22.8447
29	29	6505.85	845.68	5634.07	732.36	23.0270	22.8466
30	30	6471.53	845.10	5604.35	731.86	23.0266	22.8462
31	31	6881.27	851.72	5959.18	737.59	23.0314	22.8510
32	32	6763.53	849.89	5857.21	736.01	23.0301	22.8496
33	33	6725.12	849.28	5823.95	735.48	23.0297	22.8492
34	34	6558.69	846.57	5679.82	733.13	23.0277	22.8473
35	35	6501.71	845.61	5630.48	732.30	23.0270	22.8466
36	36	6440.26	844.57	5577.26	731.39	23.0262	22.8458
37	37	6399.90	843.87	5542.31	730.79	23.0257	22.8453
38	38	6356.05	843.10	5504.34	730.13	23.0251	22.8447
39	39	6262.35	841.43	5423.19	728.68	23.0239	22.8435
40	40	5897.64	834.50	5107.36	722.68	23.0187	22.8384
41	41	5857.86	833.70	5072.91	721.98	23.0181	22.8378
42	42	6463.34	844.96	5597.26	731.74	23.0265	22.8461
43	43	6422.71	844.26	5562.07	731.13	23.0260	22.8456

44	44	6422.71	844.26	5562.07	731.13	23.0260	22.8456
45	45	6257.22	841.34	5418.75	728.60	23.0238	22.8434
46	46	6124.18	838.89	5303.54	726.48	23.0220	22.8416
47	47	5710.21	830.64	4945.04	719.33	23.0157	22.8355
48	48	5662.22	829.62	4903.48	718.45	23.0150	22.8347
49	49	6161.28	839.58	5335.67	727.08	23.0225	22.8422
50	50	6044.04	837.37	5234.14	725.16	23.0208	22.8405
51	51	5680.26	830.00	4919.10	718.78	23.0153	22.8350

Dari table 4.1 dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan bisa direduksi dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif ha silnyapun terbukti efektif mampu mereduksi besarnya arus gangguan. Pada Gambar 4.3 dan 4.4 adalah hasil simulasi arus gangguan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.



Gambar 4.3 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL tipe aktif



Gambar 4.4 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL tipe aktif

Dari gambar 4.3 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, arus menjadi naik pada waktu $t = 0.02$ s . Pada gambar 4.4 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka besarnya arus gangguan dapat dikurangi, waktu kerja SFCL untuk mengurangi arus gangguan terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4 arus gangguan yang dimulai dari $t = 0.02$ s akan direduksi oleh SFCL pada waktu yang sama dimulainya arus gangguan terjadi.

4.2.2 Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa

Saat terjadi gangguan, tegangan pada bus 1 sampai bus 51 akan menurun. Perhitungan nilai tegangan dilakukan dari bus 1 sampai bus 51. Perhitungan dilakukan sebelum jaringan distribusi dipasang SFCL dan sesudah dipasang SFCL. Untuk mencari besarnya tegangan tanpa SFCL bisa menggunakan persamaan (2.6) dan Saat dipasang SFCL bisa dicari dengan persamaan (3.15). Hasil Perhitungan Tegangan di tunjukan pada table 4.3.

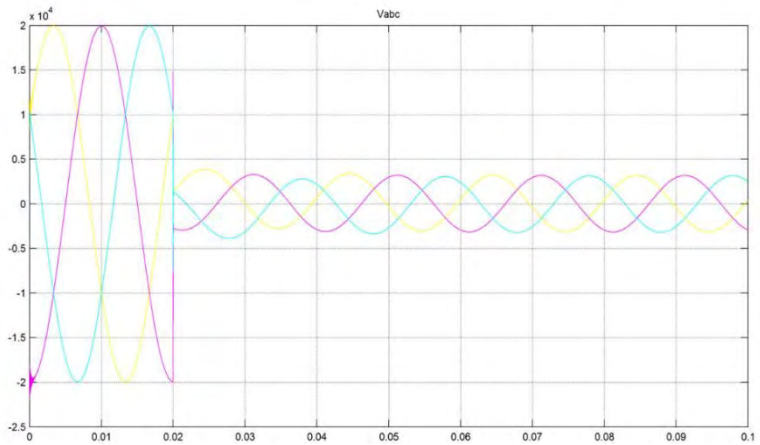
Tabel 4.2 Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Tegangan Bus Akibat Arus Gangguan 3 Fasa(kV)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	1.708	18.485
2	2	2.382	18.490
3	3	2.956	18.494
4	4	3.244	18.496
5	5	5.805	18.520
6	6	6.004	18.522
7	7	6.199	18.525
8	8	6.572	18.529
9	9	6.751	18.531
10	10	6.925	18.533
11	11	7.260	18.538
12	12	4.899	18.511
13	13	5.611	18.518
14	14	6.392	18.527
15	15	6.572	18.529
16	16	6.747	18.531
17	17	7.004	18.534
18	18	7.175	18.536
19	19	7.175	18.536
20	20	7.306	18.538
21	21	7.370	18.539
22	22	7.597	18.542
23	23	7.708	18.544
24	24	7.999	18.548
25	25	8.875	18.562

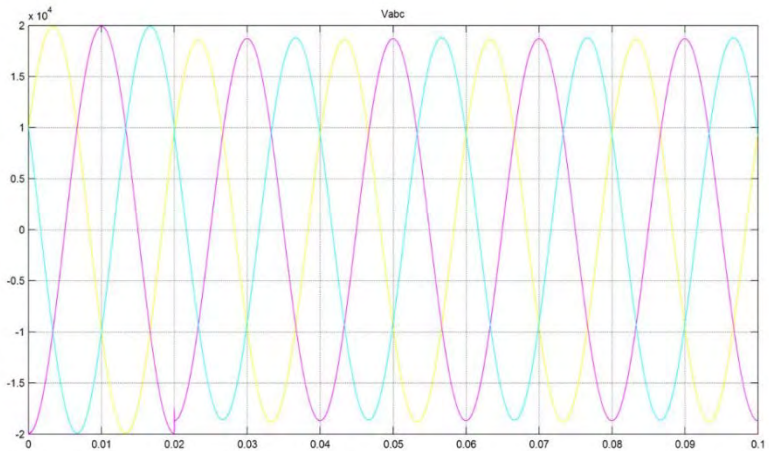
26	26	9.597	18.574
27	27	9.424	18.571
28	28	9.649	18.575
29	29	9.401	18.571
30	30	9.458	18.572
31	31	8.784	18.560
32	32	8.978	18.563
33	33	9.041	18.564
34	34	9.315	18.569
35	35	9.408	18.571
36	36	9.509	18.573
37	37	9.575	18.574
38	38	9.646	18.575
39	39	9.800	18.578
40	40	10.393	18.590
41	41	10.458	18.592
42	42	9.471	18.572
43	43	9.537	18.573
44	44	9.537	18.573
45	45	9.808	18.578
46	46	10.025	18.583
47	47	10.697	18.597
48	48	10.775	18.599
49	49	9.964	18.581
50	50	10.155	18.585
51	51	10.746	18.598

Dari table 4.3 dapat dilihat bahwa penurunan besarnya nilai tegangan bus 1 sampai bus 51 bisa diperbaiki dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif hasilnya pun terbukti efektif mampu memperbaiki tegangan kedip.

Pada Gambar 4.5 dan 4.6 adalah hasil simulasi tegangan dip saat terjadi gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.



Gambar 4.5 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL tipe aktif

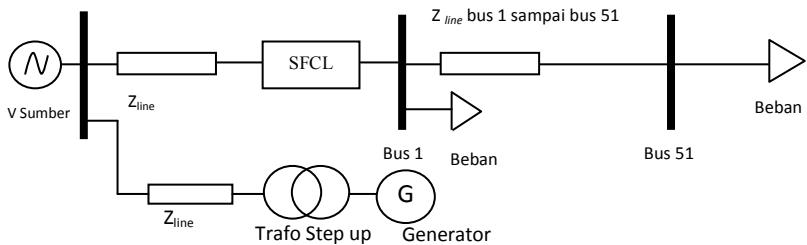


Gambar 4.6 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL tipe aktif

Dari gambar 4.5 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, tegangan menjadi turun pada waktu $t = 0.02$ s . Pada gambar 4.6 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka tegangan dip dapat diperbaiki, waktu kerja SFCL untuk memperbaiki tegangan dip terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6 gangguan yang dimulai dari $t = 0.02$ s maka tegangan dip akan diperbaiki oleh SFCL pada waktu yang sama saat dimulainya gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi.

4.3 Analisis Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan Distributed Generation (DG)

Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian pada penyulang bandilan dengan menambahkan distributed generation (DG). Pemasangan DG dipasang pada Gardu Induk (sumber) , seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Penambahan generator pada jaringan distribusi

Dengan data Generator sebagai berikut :

Daya (P) = 3 MW

$X_d = 0.19$

$\cos \phi = 0.85$

kV = 6.8 kV

Data Trafo Step Up

MVA = 8 MVA

$X'' = 0.065$

4.3.1 Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan Distributed Generation (DG)

Pada analisis tugas akhir ini, akan di lakukan perhitungan besarnya arus hubung singkat apabila pada penyulang Bandilan ada penambahan DG sebelum jaringan distribusi dipasang SFCL dan setelah dipasang SFCL dilakukan dari 1 okasi gangguan terjadi dibus 1 sampai bus 51 . Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.3

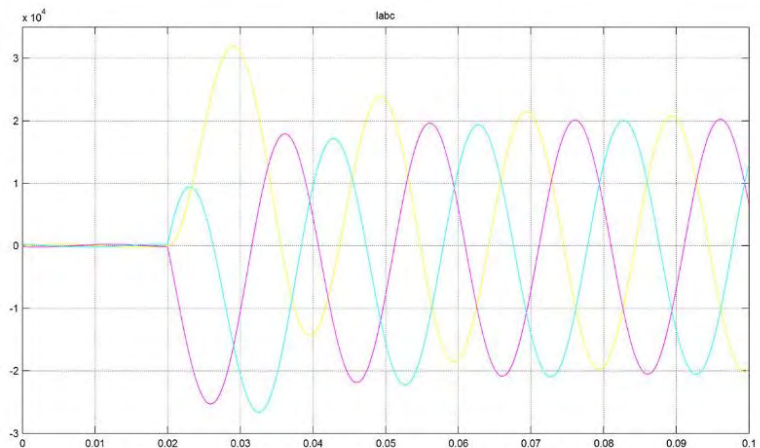
Tabel 4.3 Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Arus Hubung Singkat					
		3 Phasa (A)		2 phasa (A)		1 phasa (A)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	11365.65	1206.30	9842.65	1044.65	25.725	25.541
2	2	11010.39	1203.50	9535.00	1042.23	25.723	25.539
3	3	10702.49	1200.93	9268.36	1040.01	25.721	25.538
4	4	10546.50	1199.58	9133.27	1038.84	25.720	25.537
5	5	9105.52	1185.03	7885.38	1026.24	25.711	25.528
6	6	8989.50	1183.67	7784.91	1025.06	25.710	25.527
7	7	8876.25	1182.31	7686.83	1023.88	25.709	25.526
8	8	8657.74	1179.59	7497.60	1021.53	25.708	25.525
9	9	8552.30	1178.23	7406.29	1020.35	25.707	25.524
10	10	8449.31	1176.87	7317.11	1019.17	25.706	25.523
11	11	8250.37	1174.16	7144.82	1016.83	25.704	25.521
12	12	9625.21	1190.75	8335.43	1031.19	25.715	25.532
13	13	9217.20	1186.31	7982.09	1027.34	25.712	25.529
14	14	8763.51	1180.92	7589.20	1022.68	25.709	25.525
15	15	8657.74	1179.59	7497.60	1021.53	25.708	25.525
16	16	8554.39	1178.26	7408.10	1020.37	25.707	25.524

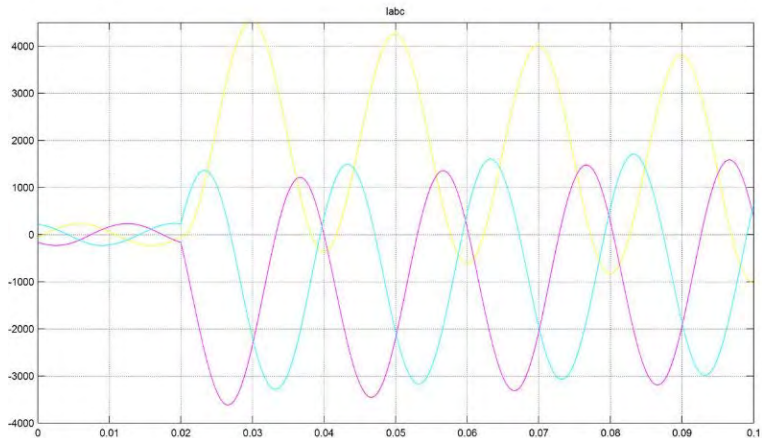
17	17	8402.74	1176.25	7276.77	1018.63	25.706	25.523
18	18	8301.22	1174.87	7188.85	1017.44	25.705	25.522
19	19	8301.22	1174.87	7188.85	1017.44	25.705	25.522
20	20	8223.24	1173.78	7121.33	1016.50	25.704	25.521
21	21	8184.78	1173.24	7088.02	1016.03	25.704	25.521
22	22	8049.19	1171.29	6970.60	1014.34	25.702	25.519
23	23	7983.03	1170.32	6913.31	1013.50	25.702	25.519
24	24	7808.21	1167.68	6761.91	1011.21	25.700	25.517
25	25	7277.41	1158.92	6302.23	1003.63	25.694	25.511
26	26	6835.36	1150.68	5919.42	996.49	25.689	25.506
27	27	6941.43	1152.75	6011.28	998.28	25.690	25.507
28	28	6803.38	1150.04	5891.72	995.94	25.688	25.506
29	29	6955.27	1153.01	6023.26	998.51	25.690	25.508
30	30	6920.78	1152.35	5993.39	997.93	25.690	25.507
31	31	7332.48	1159.89	6349.92	1004.46	25.695	25.512
32	32	7214.19	1157.80	6247.49	1002.66	25.694	25.511
33	33	7175.60	1157.11	6214.07	1002.06	25.693	25.510
34	34	7008.37	1154.02	6069.24	999.38	25.691	25.508
35	35	6951.11	1152.93	6019.66	998.44	25.690	25.508
36	36	6889.34	1151.74	5966.17	997.41	25.690	25.507
37	37	6848.78	1150.94	5931.04	996.72	25.689	25.506
38	38	6804.70	1150.07	5892.87	995.96	25.688	25.506
39	39	6710.51	1148.17	5811.30	994.31	25.687	25.504
40	40	6343.74	1140.27	5493.68	987.47	25.682	25.499
41	41	6303.72	1139.36	5459.02	986.68	25.681	25.499
42	42	6912.55	1152.19	5986.27	997.80	25.690	25.507
43	43	6871.71	1151.39	5950.90	997.11	25.689	25.507
44	44	6871.71	1151.39	5950.90	997.11	25.689	25.507
45	45	6705.35	1148.06	5806.83	994.22	25.687	25.504
46	46	6571.58	1145.27	5690.99	991.81	25.685	25.502

47	47	6155.16	1135.87	5330.37	983.66	25.679	25.496
48	48	6106.87	1134.71	5288.55	982.65	25.678	25.495
49	49	6608.89	1146.06	5723.30	992.49	25.686	25.503
50	50	6490.99	1143.54	5621.20	990.30	25.684	25.501
51	51	6125.02	1135.15	5304.27	983.04	25.678	25.496

Dari table 4.3 dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan lebih besar dibanding saat jaringan distribusi tidak terhubung dengan DG pada tabel 4.1 , hal ini karena adanya arus kontribusi dari DG saat terjadi gangguan. Dari table 4.5 dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan bisa direduksi dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif ha silnyapun terbukti efektif mampu mereduksi besarnya arus gangguan. Pada Gambar 4.8 dan 4.9 adalah hasil simulasi arus gangguan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.



Gambar 4.8 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Tanpa SFCL tipe aktif



Gambar 4.9 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Dan SFCL tipe aktif

Dari gambar 4.8 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, arus menjadi naik pada waktu $t = 0.02 \text{ s}$. Pada gambar 4.9 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka besarnya arus gangguan dapat dikurangi, waktu kerja SFCL untuk mengurangi arus gangguan terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9 arus gangguan yang dimulai dari $t = 0.02 \text{ s}$ akan direduksi oleh SFCL pada waktu yang sama dimulainya arus gangguan terjadi.

4.3.2 Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa

Pada analisis tugas akhir ini, akan di lakukan perhitungan tegangan dip akibat hubung singkat 3 fasa pada bus 1 sampai bus 51 apabila pada penyulang Bandilan ada penambahan DG sebelum jaringan distribusi dipasang SFCL dan setelah dipasang SFCL. Perhitungan nilai tegangan dilakukan dari bus 1 sampai bus 51. Hasil Perhitungan tegangan di tunjukan pada table 4.4.

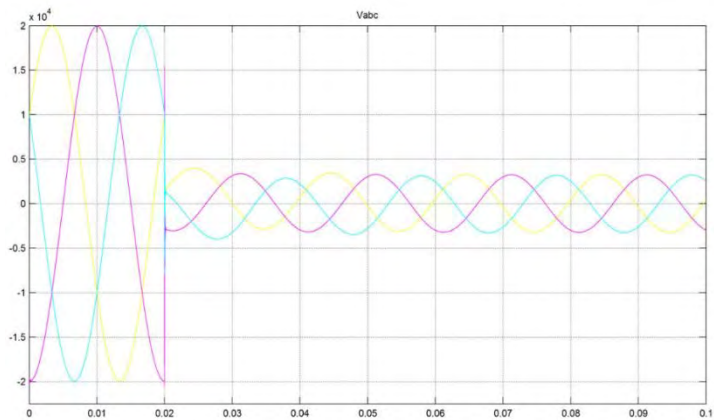
Tabel 4.4 Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Saat Terjadi Gangguan 3 fasa

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Tegangan Bus Akibat Arus Gangguan (kV)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	1.770	18.538
2	2	2.465	18.543
3	3	3.055	18.547
4	4	3.351	18.549
5	5	5.966	18.572
6	6	6.169	18.575
7	7	6.366	18.577
8	8	6.744	18.581
9	9	6.925	18.583
10	10	7.102	18.585
11	11	7.441	18.589
12	12	5.044	18.563
13	13	5.769	18.570
14	14	6.561	18.579
15	15	6.744	18.581
16	16	6.922	18.583
17	17	7.181	18.586
18	18	7.354	18.588
19	19	7.354	18.588
20	20	7.487	18.590
21	21	7.552	18.591
22	22	7.781	18.594
23	23	7.892	18.595
24	24	8.185	18.599
25	25	9.066	18.612
26	26	9.790	18.625

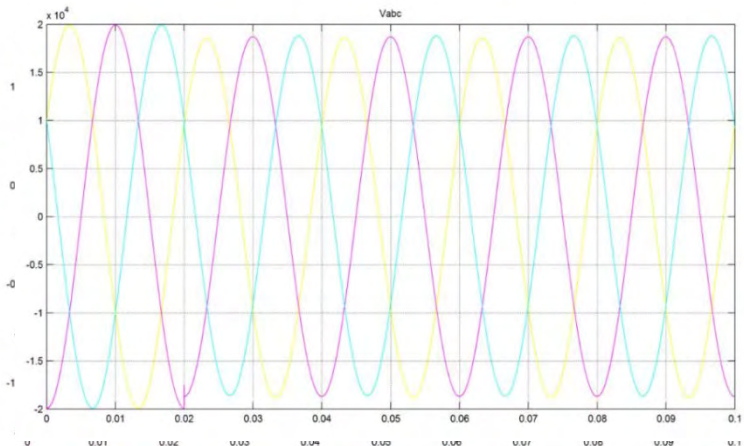
27	27	9.617	18.622
28	28	9.842	18.626
29	29	9.595	18.621
30	30	9.651	18.622
31	31	8.976	18.611
32	32	9.170	18.614
33	33	9.234	18.615
34	34	9.508	18.620
35	35	9.602	18.621
36	36	9.702	18.623
37	37	9.768	18.624
38	38	9.840	18.626
39	39	9.993	18.629
40	40	10.586	18.640
41	41	10.651	18.642
42	42	9.664	18.623
43	43	9.731	18.624
44	44	9.731	18.624
45	45	10.002	18.629
46	46	10.219	18.633
47	47	10.890	18.647
48	48	10.967	18.649
49	49	10.158	18.632
50	50	10.349	18.635
51	51	10.938	18.648

Dari table 4.4 dapat dilihat bahwa penurunan besarnya nilai tegangan bus 1 sampai bus 51 bisa diperbaiki dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif hasilnya pun terbukti efektif mampu memperbaiki tegangan kedip.

Pada Gambar 4.10 dan 4.11 adalah hasil simulasi tegangan dip saat terjadi gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.



Gambar 4.10 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Tanpa SFCL tipe aktif



Gambar 4.11 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Dan SFCL tipe aktif

Dari gambar 4.10 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, tegangan menjadi turun pada waktu $t = 0.02$ s . Pada gambar 4.11 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka tegangan dip dapat diperbaiki, waktu kerja SFCL untuk memperbaiki tegangan dip terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 4.10 dan 4.11 gangguan yang dimulai dari $t = 0.02$ s maka tegangan dip akan diperbaiki oleh SFCL pada waktu yang sama saat dimulainya gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

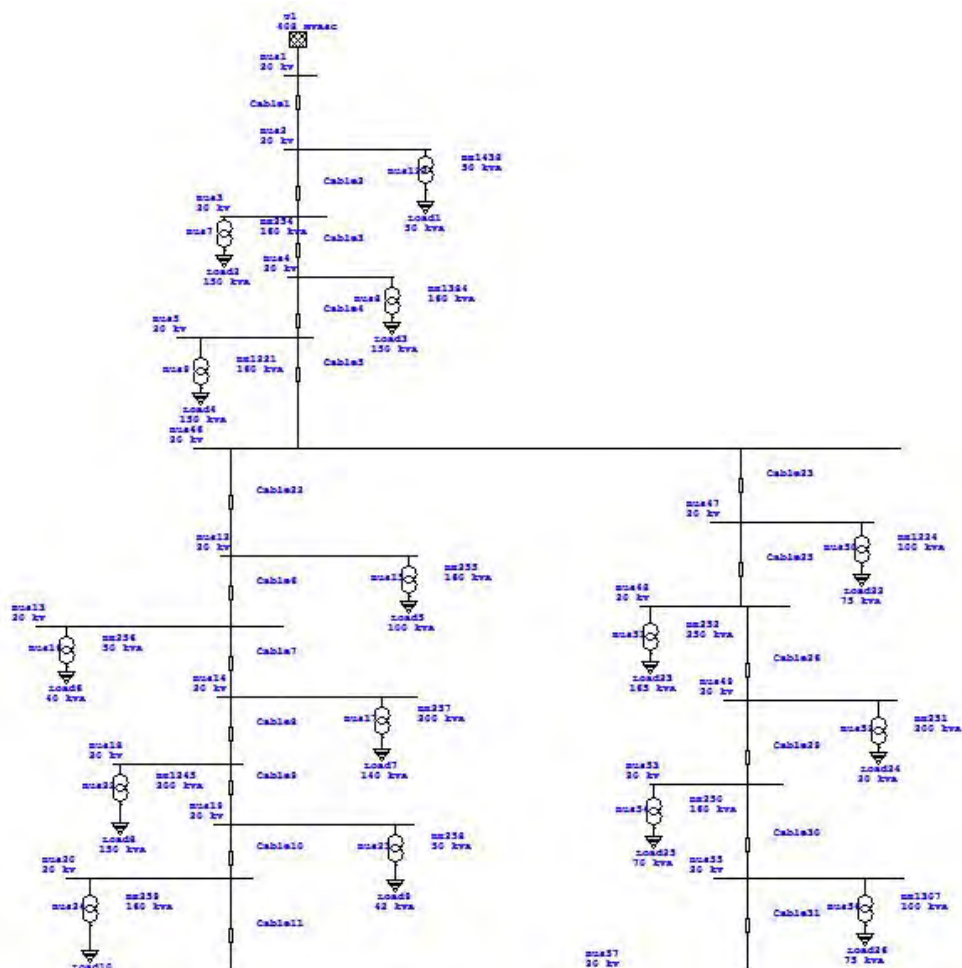
5.1 Kesimpulan

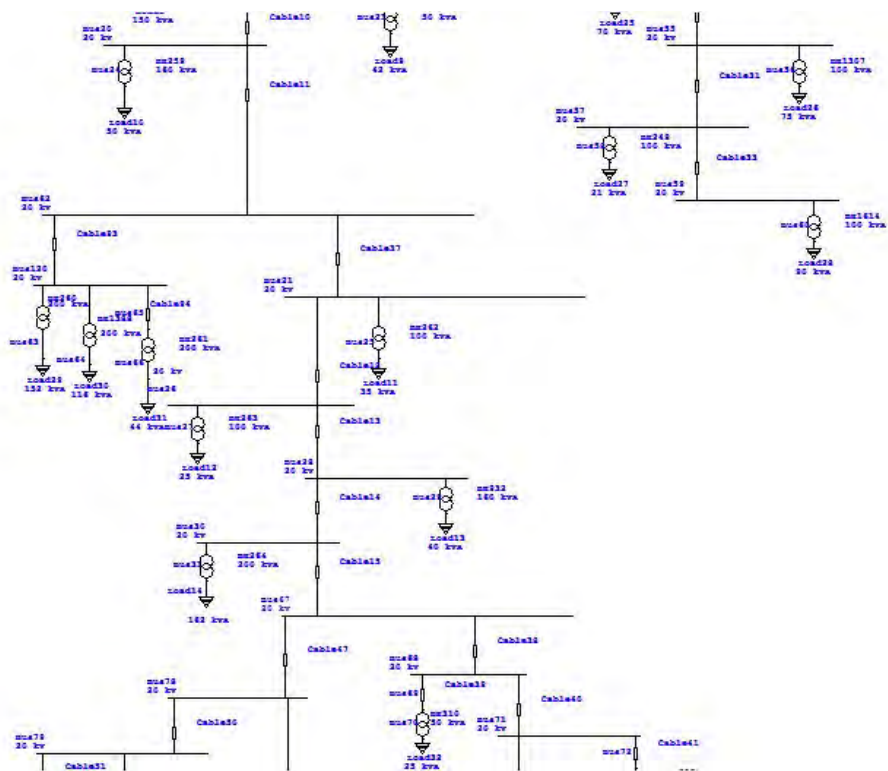
Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dan menganalisis hasil dari perhitungan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

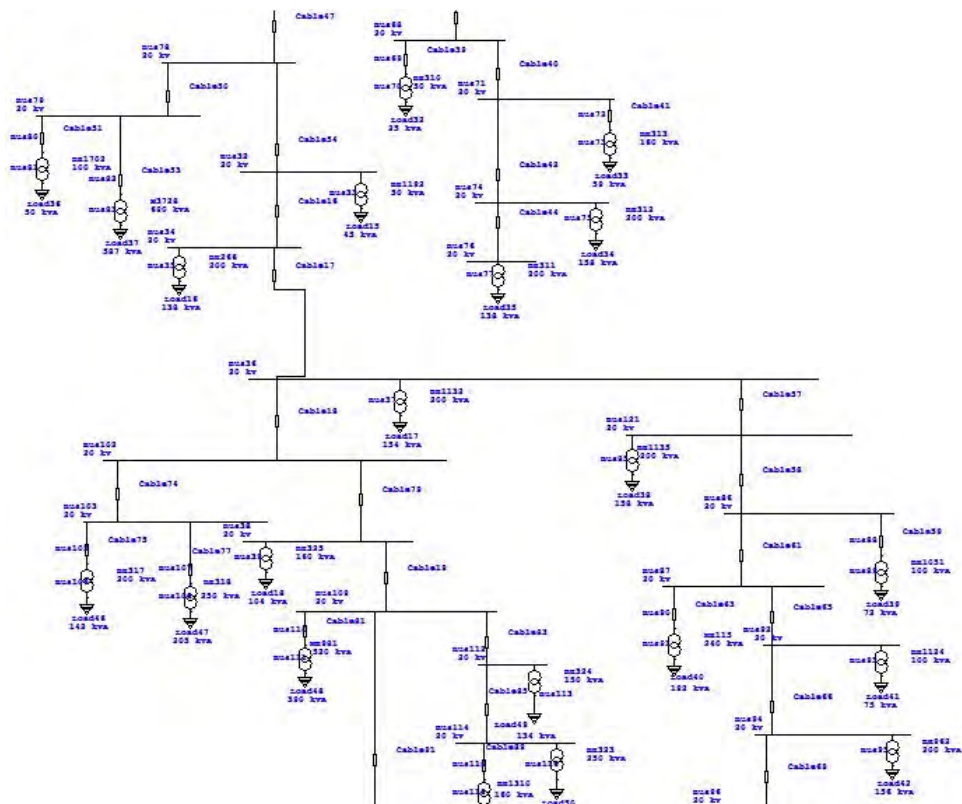
1. Dalam keadaan jaringan distribusi tidak ada gangguan, SFCL tipe aktif tidak akan berpengaruh terhadap jaringan distribusi karena adanya arus injeksi di belitan sekunder SFCL yang telah di kontrol nilainya untuk mengatur tegangan U_l di belitan primer SFCL menjadi nol sehingga menyebabkan impedansi SFCL tipe aktif menjadi nol.
2. Dalam keadaan jaringan distribusi terjadi gangguan, SFCL tipe aktif akan berpengaruh terhadap jaringan distribusi karena tegangan U_l di belitan primer SFCL naik dan tidak lagi nol sehingga menyebabkan kenaikan impedansi SFCL tipe aktif.
3. Saat terjadi gangguan hubung singkat jaringan distribusi yang diberi tambahan DG arus gangguannya lebih besar dibanding dengan jaringan tanpa DG. Hal ini karena adanya arus kontribusi dari DG saat terjadi gangguan hubung singkat.
4. Dari hasil perhitungan SFCL tipe aktif terbukti mampu mereduksi arus gangguan akibat hubung singkat secara baik, serta mampu memperbaiki tegangan dip/dip voltage.

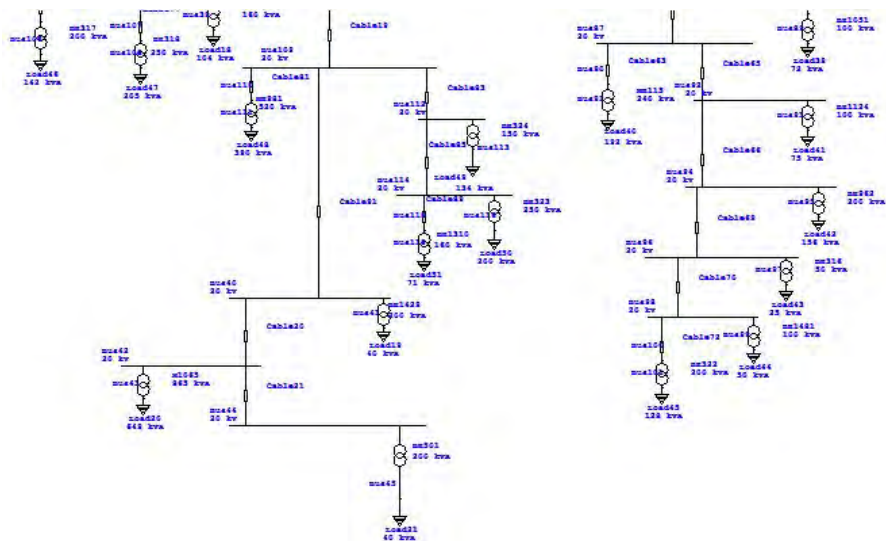
5.2 Saran

1. Hasil tugas akhir ini dapat digunakan PT.PLN sebagai masukan untuk memasang SFCL tipe aktif di jaringan distribusi guna mengurangi besarnya arus gangguan sehingga peralatan-peralatan yang ada di jaringan tidak cepat rusak.









ANALISIS REDUKSI ARUS GANGGUAN DAN PERBAIKAN TEGANGAN DIP PADA SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI RUNGKUT DENGAN SFCL TIPE AKTIF

Arif Nugroho, Ardyono Priyadi, Rony Seto Wibowo

Jurusan Teknik Elektro FTI ITS

Jln. Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya, Jawa Timur

Abstrak--- Pada Tugas akhir ini, dampak dari pemasangan *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) tipe aktif pada jaringan distribusi Rungkut PT PLN APJ Surabaya Selatan penyulang bandilan akan dihitung dan dianalisa. Sistem distribusi yang digunakan adalah jaringan radial. Dengan mengontrol arus injeksi dibelitan sekunder SFCL, tegangan pada belitan primer SFCL akan diatur menjadi nol. Sehingga, saat tidak terjadi gangguan di jaringan distribusi, SFCL tidak akan mempengaruhi jaringan distribusi dan saat terjadi gangguan di jaringan distribusi, SFCL akan menaikkan nilai impedansinya dan mengurangi besarnya arus gangguan serta memperbaiki tegangan dip. Dalam kasus ini akan diperhitungkan arus hubung singkat dan tegangan dip dengan memodelkan jaringan distribusi tanpa dengan penambahan generator distribusi dan dengan penambahan generator distribusi serta dengan jarak gangguan yang berbeda-beda. Hasil perhitungan arus hubung singkat dan tegangan dip pada jaringan tanpa penambahan generator distribusi akan dibandingkan dengan jaringan yang ditambahkan generator distribusi, serta membandingkan saat jaringan sebelum dipasang SFCL tipe aktif dan setelah dipasang SFCL tipe aktif.

Kata kunci : *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) tipe aktif, distribusi runkut, jaringan radial, arus hubung singkat, tegangan dip, generator distribusi

I. PENDAHULUAN

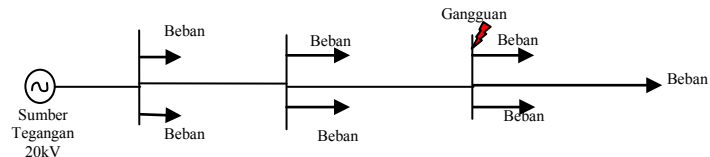
Jaringan distribusi merupakan jaringan yang paling dekat dengan konsumen/pelanggan. Dalam operasi sistem tenaga listrik kadang terjadi gangguan-gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Gangguan adalah penghalang dari suatu sistem yang sedang beroperasi atau suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari kondisi normal. Permasalahan kuliatas daya umumnya adalah dampak dari penyimpangan tegangan, arus atau frekuensi yang dapat menyebabkan kegagalan atau kesalahan operasi pada peralatan penyedia layanan maupun konsumen. Penyimpangan ini dapat disebabkan gangguan di jaringan, baik hubung singkat pada sistem, kenaikan arus dan beban secara mendadak, maupun kegagalan kerja peralatan. Arus gangguan yang terlalu besar dapat merusak peralatan di jaringan distribusi bahkan tidak cukup teramankan oleh peralatan-peralatan proteksi yang terpasang. Untuk mengatasi hal tersebut dipasanglah SFCL (*Superconducting Fault Current Limiter*) tipe aktif untuk mereduksi arus gangguan dan memperbaiki kedip tegangan [1][2][3]. Sehingga dapat menghindari kerusakan pada peralatan distribusi dan meningkatkan sistem keamanan dan keandalan.

II. DASAR TEORI

A. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri yaitu gangguan hubung singkat tiga

fasa, sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu. Gambar 1 adalah contoh gangguan pada jaringan radial.



Gambar 1. Gangguan Pada Jaringan Radial

Sebagian besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetri. Gangguan tak simetri ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah. Gangguan dapat diperkecil dengan cara pemeliharaannya.

Adanya gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan rusaknya peralatan listrik, berkurangnya stabilitas daya, dan terhentinya kontinuitas daya akibat membukanya circuit breaker.

B. Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan praktis untuk menghitung besar arus hubung singkat dalam sistem distribusi dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Hubung Singkat Tiga Fasa

Kondisi saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa (Turan Gonen, 1986: 284) [4]:

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$V_a = V_b = V_c$$

Karena sistemnya seimbang maka urutan negatif dan urutan nol tidak ada, sehingga diperoleh:

$$V_a = V_f - I_{a1} Z_{a1} = 0 \quad (1)$$

$$I_{a1} = I_a = I_f = \frac{V_f}{Z} \quad (2)$$

Hubung singkat ini melibatkan ketiga fasa. Arus hubung singkat tiga fasa diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_f 3\phi = \frac{E_{ph}}{Z} \quad (3)$$

Untuk gangguan tiga fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif, nilai ekivalen Z_1 , dan tegangannya adalah E fasa (line to netral).

2. Hubung Singkat Antar Fasa

Hubung singkat ini terjadi antara dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Arus hubung singkat antar fasa diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_f 2\phi = \frac{E_{ph} \times \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_f 3\phi \quad (4)$$

Untuk gangguan fasa ke fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif dan urutan negatif, nilai ekivalen $Z_1 + Z_2$.

3. Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol (Z_0), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan.

$$I_f 1\phi = \frac{E_{ph} \times 3}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (5)$$

C. Kedip Tegangan

Didefinisikan sebagai fenomena penurunan magnitude tegangan efektif terhadap harga nominal selama interval waktu yang telah ditentukan.

Menurut *IEEE std. 1159-1995, IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*, kedip tegangan atau *voltage sag/dip* adalah suatu penurunan nilai rms tegangan yang bernilai antara 0,1 sampai 0,9 pu dari tegangan normal dengan durasi 0,5 cycle (10 rms) sampai 1 menit.

Definisi *ANSI std. 1100-1992, voltage sag/dip* adalah pengurangan besarnya tegangan rms AC, pada frekuensi daya, dengan durasi dari 0,5 cycle sampai beberapa detik.

1. Tegangan dapat turun dibawah level normal selama beberapa cycle dan dapat mempengaruhi beban kritis yang dapat menyebabkan trip.

2. Peralatan yang di control secara elektronik, tegangan 20% dibawah normal akan menyebabkan mati.

Definisi IEC 61000-2-8 2000 (*international electrothechnic commission*), tegangan kedip adalah pengurangan tegangan secara mendadak, terutama pada sistem suplai kelistrikan dibawah ambang kedip yang terjadi dengan interval pemulihan yang singkat.

D. Besaran Tegangan Kedip/ Voltage Dip Pada Sistem Radial

Besaran kedip digunakan sebagai fungsi jarak terhadap gangguan dinyatakan sebagai persamaan :

$$V_{sag} = \frac{Z_{line}}{Z_{sumber} + Z_{line}} V_{bus} \quad (6)$$

Z_{line} adalah impedansi dari panjang saluran/jaringan distribusi dari sumber samapai ke titik gangguan, Z_{sumber} adalah impedansi sumber jaringan sistem ditribusi dimana pada penyulang ini sumber berasal dari trafo gardu induk.

E. Distributed Generation (DG)

DG atau pembangkit distribusi adalah unit-unit pembangkit kecil yang terhubung dengan sistem distribusi yang berfungsi sebagai :

1. Meningkatkan dan menstabilkan kualitas energi listrik
2. Meningkatkan ketersediaan dan keandalan energi listrik
3. Mengurangi arus beban penuh.
4. Menghemat biaya energi
5. Dapat menjual energi listrik ke pengguna lain
6. Kompensasi daya reaktif

DG adalah sumber yang hanya mempunyai ukuran kapasitas terbatas, bisaanya ≥ 0 sampai 5 MW, modular teknologi pembangkitan tenaga sangat dibutuhkan jaringan distribusi karena sistem tersebut mampu mengurangi losses sistem, memperbaiki kualitas tenaga dan untuk keandalan tenaga listrik. DG digunakan untuk menangani naiknya konsumsi energi listrik yang dibutuhkan beban[5][6].

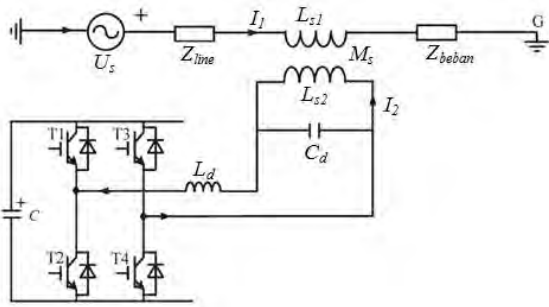
Sistem tenaga listrik dimasa depan harus serba guna dan fleksibel sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat bebas ditransmisikan, didistribusikan dan dikonsumsi.

III. PENERAPAN SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER TIPE AKTIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI

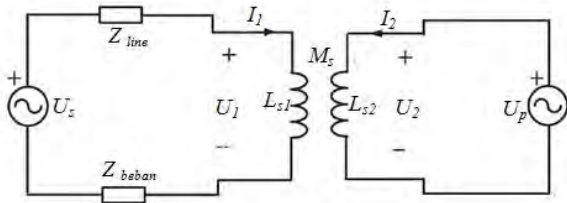
A. Struktur Dan Cara Kerja *Superconducting Fault Current Limiter Active Type* (SFCL Tipe Aktif)

Superconducting fault current limiter Active Type (SFCL Tipe Aktif) telah menjadi daya apatur yang paling menjanjikan untuk menekan besarnya arus hubung singkat. SFCL tipe aktif digunakan untuk mengurangi arus gangguan pada sistem tenaga listrik

[7]. SFCL tipe aktif terdiri dari sebuah superkonduktor transformator inti udara dan konverter PWM seperti pada gambar 2[8]. L_{s1}, L_{s2} adalah *self-inductance* dua buah belitan *superconducting*, M_s adalah *mutual inductance*. L_d dan C_d digunakan sebagai filter harmonisa orde tinggi yang disebabkan konverter. Medan magnet dalam inti udara dapat dikontrol dengan menyesuaikan arus konverter output, dan kemudian impedansi SFCL tipe aktif dapat diatur untuk membatasi arus gangguan dan juga memungkinkan untuk penekanan tegangan lebih [8].



Gambar 2. Rangkaian pengganti satu fasa SFCL tipe aktif



Gambar 3. Rangkaian ekivalen SFCL tipe aktif

Dalam keadaan normal (tanpa gangguan), arus injeksi I_2 di belitan sekunder (L_{s2}) transformator akan di control nilainya, dimana medan magnet di *air-core* bisa dikompensasikan ke nol, sehingga SFCL tidak akan mempengaruhi jaringan utama (jaringan distribusi). Ketika gangguan terdeteksi, arus injeksi I_2 akan mengatur amplitude atau sudut fasanya, untuk mengontrol tegangan utama superkonduktor transformator yang di seri dengan jaringan utama (jaringan distribusi), dan selanjutnya gangguan bisa ditekankan/dikurangi sampai batas tertentu.

Dibawah ini, penjelasan cara mengatur spesifik SFCL . Dalam keadaan normal, ada dua persamaan dapat dicapai.[8]

$$U_s = I_1(Z_{line} + Z_{beban}) + j\omega L_{s1} I_1 - j\omega M_s I_2 \quad (7)$$

Saat jaringan tidak dipasang SFCL maka nilai U_s adalah :

$$U_s = I_1(Z_{line} + Z_{beban}) \quad (8)$$

$$U_p = j\omega M_s I_1 - j\omega L_{s2} I_2 \quad (9)$$

Mengontrol I_2 sehingga $j\omega L_{s1} I_1 - j\omega M_s I_2 = 0$ dan tegangan primer U_1 pada belitan primer SFCL akan diatur menjadi nol. Dengan demikian Z_{SFCL} akan sama

dengan nol ($Z_{SFCL} = \frac{U_1}{I_1}$) . Dan I_2 bisa di seting dengan cara :

$$I_2 = U_s \sqrt{L_{s1}/L_{s2}} / (Z_{line} + Z_{beban}) k \quad (10)$$

$$k = M_s / \sqrt{L_{s1} L_{s2}} \quad (11)$$

diamana k adalah koefisien kopling.

Saat terjadi gangguan Z_{beban} mengalami hubung singkat, sehingga arus pada jaringan distribusi I_1 nilainya akan naik menjadi I_{1f} , besarnya kenaikan arus I_{1f} didapat dari arus hubung singkat maksimum, yang mana arus hubung singkat maksimum di dapat dari arus hubung singkat tiga fasa. Persamaan (3) digunakan untuk mencari arus hubung singkat maksimum . Karena I_1 naik maka tegangan pada belitan primer SFCL U_1 juga akan naik menjadi U_{1f} .

$$U_{1f} = j\omega L_{s1} I_{1f} - j\omega M_s I_2 \quad (12)$$

Z_{SFCL} bisa di control :

$$Z_{SFCL} = \frac{U_{1f}}{I_{1f}} = j\omega L_{s1} - \frac{j\omega M_s I_2 (Z_{line} + j\omega L_{s1})}{U_s + j\omega M_s I_2} \quad (13)$$

Menurut perbedaan dalam tujuan mengatur I_2 , ada tiga mode operasi:

- 1) Membuat I_2 tetap dalam keadaan semula, sehingga Z_{SFCL} bisa dicari dengan :

$$Z_{SFCL} = Z_{beban} (j\omega L_{s1}) / (Z_{line} + Z_{beban} + j\omega L_{s1}) \quad (14)$$

- 2) Mengontro I_2 ke nol, sehingga Z_{SFCL} bisa dicari dengan :

$$Z_{SFCL} = j\omega L_{s1} \quad (15)$$

- 3) Meregulasi sudut fasa I_2 untuk membuat perbedaan sudut antara U_s dengan $j\omega M_s I_2$ menjadi 180° .

Dengan menseting :

$$j\omega M_s I_2 = (-c) \times U_s, \text{ sehingga :}$$

$$c = -\frac{j\omega M_s I_2}{U_s} \quad (16)$$

sehingga Z_{SFCL} dapat dicari dengan cara :

$$Z_{SFCL} = c \times Z_{line} / (1 - c) + j\omega L_{s1} / (1 - c) \quad (17)$$

B. Penerapan SFCL tipe Aktif Pada Tegangan Kedip

Jika SFCL dipasang di jaringan maka tegangan Bus ketika terjadi gangguan bisa dicari dengan cara [7] :

$$V_{sag} = \frac{Z_{line} + Z_{SFCL}}{Z_{sumber} + Z_{line} + Z_{SFCL}} V_{bus} \quad (18)$$

Z_{line} adalah impedansi dari panjang saluran/jaringan distribusi dari sumber samapai ke titik gangguan, Z_{sumber} adalah impedansi sumber jaringan sistem ditribusi dimana pada penyulang ini sumber berasal dari trafo gardu induk.

IV. PERHITUNGAN DAN ANALISIS

Tugas akhir ini dilakukan untuk menganalisa dampak dari penambahan *Superconducting Fault Current Limiter Active Type* pada jaringan distribusi rungkut 20 kV penyulang Bandilan saat terjadi gangguan hubung singkat dan saat terjadi tegangan kedip. Perhitungan dan Simulasi menggunakan Matlab.

Tabel 1. Data jaringan Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

No.	Bus	Tegangan (kV)	z1 dan z2 /KM		z0 /KM		Panjang jaringan	
			r	x	r	x		
1	0	1	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	232
2	0	2	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	336
3	0	3	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	431
4	0	4	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	481
5	0	5	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1016
6	0	6	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1066
7	0	7	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1116
8	0	8	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1216
9	0	9	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1266
10	0	10	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1316
11	0	11	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1416
12	0	12	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	806
13	0	13	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	969
14	0	14	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1167
15	0	15	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1216
16	0	16	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1265
17	0	17	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1339
18	0	18	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1390
19	0	19	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1390
20	0	20	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1430
21	0	21	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1450
22	0	22	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1522
23	0	23	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1558
24	0	24	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1656
25	0	25	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1982
26	0	26	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2292
27	0	27	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2214
28	0	28	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2316
29	0	29	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2204
30	0	30	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2229
31	0	31	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1946
32	0	32	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2024
33	0	33	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2050
34	0	34	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2166
35	0	35	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2207
36	0	36	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2252
37	0	37	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2282
38	0	38	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2315
39	0	39	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2387
40	0	40	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2688
41	0	41	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2723
42	0	42	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2235
43	0	43	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2265
44	0	44	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2265
45	0	45	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2391
46	0	46	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2497
47	0	47	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2857
48	0	48	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2902
49	0	49	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2467
50	0	50	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2563
51	0	51	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2885

Tabel 2. Data Beban Jaringan Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

No.	Bus	Beban kVA
1	1	50
2	2	160
3	3	160
4	4	160
5	5	100
6	6	250
7	7	200
8	8	160
9	9	100
10	10	100
11	11	100
12	12	160
13	13	50
14	14	200
15	15	200
16	16	50
17	17	160
18	18	200
19	19	200
20	20	200
21	21	100
22	22	100
23	23	160
24	24	200
25	25	50
26	26	160
27	27	200
28	28	200
29	29	100
30	30	690
31	31	50
32	32	200
33	33	200
34	34	200
35	35	100
36	36	240
37	37	100
38	38	200
39	39	50
40	40	100
41	41	200
42	42	160
43	43	250
44	44	160
45	45	520
46	46	150
47	47	250
48	48	160
49	49	200
50	50	865
51	51	200

Tabel 3. Data Trafo GI 5

Kapasitas	50 MVA
kV Primer	150 kV
kV Sekunder	20 kV
Reaktansi	12.266%
Resistansi Pentanahan	500 ohm

Tabel 4. Parameter SFCL Tipe Aktif

SFCL Tipe aktif	
Primary Inductance (Ls1)	50 mH
Secondary Inductance (Ls2)	30 mH
Mutual Inductance (Ms)	32,9 mH

A. Analisis Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

Perhitungan arus hubung singkat dilakukan dari gangguan yang terjadi dibus 1 sampai bus 51, untuk mencari besarnya arus hubung singkat bisa menggunakan persamaan (3) untuk gangguan 3 fasa, persamaan (4) untuk gangguan dua fasa dan persamaan (5) untuk gangguan satu fasa ketanah.

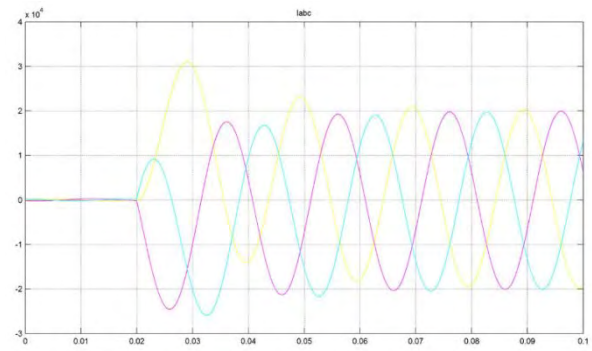
Pada saat terjadi gangguan tegangan pada belitan primer SFCL tidak lagi nol, dan SFCL akan menaikan nilai impedansi yang ada di belitan primer. Untuk mengontrol besarnya nilai Z_{SFCL} saat terjadi gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi digunakan persamaan (13), dan dalam mengatur I_2 terdapat tiga mode operasi dengan persamaan untuk mode 1 di gunakan persamaan (14), mode 2 digunakan persamaan (15) dan mode 3 di gunakan persamaan (17), besarnya Z_{SFCL} bisa dicari dengan menggunakan mode pertama .

Tabel 5. Arus Hubung Singkat pada penyulang bandilan.

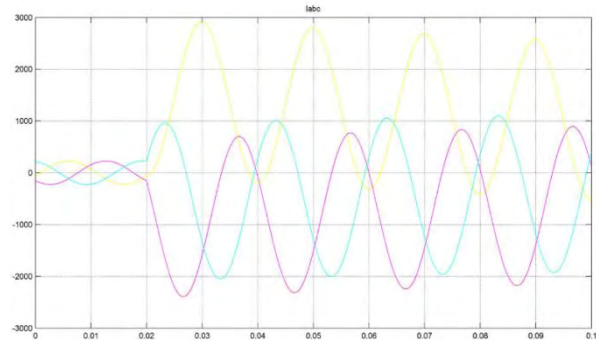
No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Arus Hubung Singkat					
		3 Fasa (A)		2 fasa (A)		1 fasa (A)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	10902.18	892.47	9441.29	772.88	23.0601	22.8792
2	2	10547.69	890.02	9134.30	770.75	23.0584	22.8775
3	3	10240.48	887.77	8868.26	768.81	23.0569	22.8760
4	4	10084.85	886.58	8733.48	767.78	23.0561	22.8752
5	5	8647.75	873.82	7488.95	756.73	23.0472	22.8665
6	6	8532.08	872.62	7388.78	755.69	23.0464	22.8657
7	7	8419.19	871.43	7291.02	754.66	23.0455	22.8648
8	8	8201.39	869.04	7102.40	752.59	23.0438	22.8632
9	9	8096.31	867.85	7011.41	751.55	23.0430	22.8623
10	10	7993.68	866.65	6922.52	750.52	23.0422	22.8615
11	11	7795.44	864.27	6750.85	748.46	23.0405	22.8599
12	12	9165.93	878.84	7937.69	761.07	23.0507	22.8699
13	13	8759.08	874.94	7585.37	757.70	23.0480	22.8673
14	14	8306.81	870.21	7193.70	753.60	23.0447	22.8640
15	15	8201.39	869.04	7102.40	752.59	23.0438	22.8632
16	16	8098.39	867.87	7013.20	751.57	23.0430	22.8624
17	17	7947.27	866.10	6882.33	750.05	23.0418	22.8611
18	18	7846.10	864.89	6794.73	748.99	23.0409	22.8603
19	19	7846.10	864.89	6794.73	748.99	23.0409	22.8603
20	20	7768.41	863.94	6727.44	748.17	23.0402	22.8596
21	21	7730.10	863.46	6694.26	747.76	23.0399	22.8593
22	22	7595.02	861.75	6577.28	746.27	23.0387	22.8581
23	23	7529.11	860.89	6520.21	745.53	23.0381	22.8575
24	24	7354.97	858.57	6369.41	743.52	23.0364	22.8558
25	25	6826.45	850.88	5911.70	736.86	23.0308	22.8504
26	26	6386.55	843.64	5530.75	730.59	23.0255	22.8451
27	27	6492.08	845.45	5622.14	732.16	23.0268	22.8464
28	28	6354.73	843.08	5503.20	730.11	23.0251	22.8447
29	29	6505.85	845.68	5634.07	732.36	23.0270	22.8466
30	30	6471.53	845.10	5604.35	731.86	23.0266	22.8462
31	31	6881.27	851.72	5959.18	737.59	23.0314	22.8510
32	32	6763.53	849.89	5857.21	736.01	23.0301	22.8496
33	33	6725.12	849.28	5823.95	735.48	23.0297	22.8492
34	34	6558.69	846.57	5679.82	733.13	23.0277	22.8473
35	35	6501.71	845.61	5630.48	732.30	23.0270	22.8466
36	36	6440.26	844.57	5577.26	731.39	23.0262	22.8458
37	37	6399.90	843.87	5542.31	730.79	23.0257	22.8453
38	38	6356.05	843.10	5504.34	730.13	23.0251	22.8447
39	39	6262.35	841.43	5423.19	728.68	23.0239	22.8435
40	40	5897.64	834.50	5107.36	722.68	23.0187	22.8384
41	41	5857.86	833.70	5072.91	721.98	23.0181	22.8378
42	42	6463.34	844.96	5597.26	731.74	23.0265	22.8461
43	43	6422.71	844.26	5562.07	731.13	23.0260	22.8456
44	44	6422.71	844.26	5562.07	731.13	23.0260	22.8456
45	45	6257.22	841.34	5418.75	728.60	23.0238	22.8434
46	46	6124.18	838.89	5303.54	726.48	23.0220	22.8416
47	47	5710.21	830.64	4945.04	719.33	23.0157	22.8355
48	48	5662.22	829.62	4903.48	718.45	23.0150	22.8347
49	49	6161.28	839.58	5335.67	727.08	23.0225	22.8422
50	50	6044.04	837.37	5234.14	725.16	23.0208	22.8405
51	51	5680.26	830.00	4919.10	718.78	23.0153	22.8350

Dari table 5 dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan bisa direduksi dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif hasilnya pun terbukti efektif mampu mereduksi besarnya arus gangguan. Pada Gambar 4 dan 5 adalah hasil simulasi arus gangguan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.

Dari gambar 4 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, arus menjadi naik pada waktu $t = 0.02$ s. Pada gambar 5 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka besarnya arus gangguan dapat dikurangi, waktu kerja SFCL untuk mengurangi arus gangguan terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 4 dan 5 arus gangguan yang dimulai dari $t = 0.02$ s akan direduksi oleh SFCL pada waktu yang sama dimulainya arus gangguan terjadi.



Gambar 4. Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL tipe aktif



Gambar 5. Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL tipe aktif

B. Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa

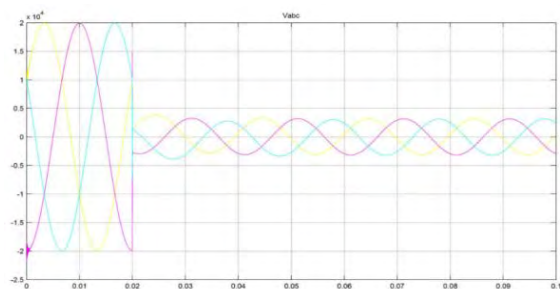
Saat terjadi gangguan, tegangan pada bus 1 sampai bus 51 akan menurun. Perhitungan nilai tegangan dilakukan dari bus 1 sampai bus 51. Perhitungan dilakukan sebelum jaringan distribusi di pasang SFCL dan sesudah dipasang SFCL. Untuk mencari besarnya tegangan tanpa SFCL bisa menggunakan persamaan (6) dan Saat dipasang SFCL bisa dicari dengan persamaan (18). Hasil Perhitungan Tegangan di tunjukan pada table 6.

Tabel 6. Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa

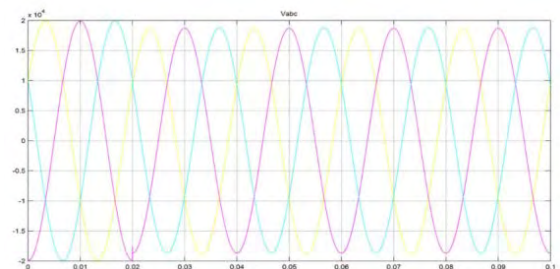
No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Tegangan Bus Akibat Arus Gangguan (kV)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	1.708	18.485
2	2	2.382	18.490
3	3	2.956	18.494
4	4	3.244	18.496
5	5	5.805	18.520
6	6	6.004	18.522
7	7	6.199	18.525
8	8	6.572	18.529
9	9	6.751	18.531
10	10	6.925	18.533
11	11	7.260	18.538
12	12	4.899	18.511
13	13	5.611	18.518
14	14	6.392	18.527
15	15	6.572	18.529

16	16	6.747	18.531
17	17	7.004	18.534
18	18	7.175	18.536
19	19	7.175	18.536
20	20	7.306	18.538
21	21	7.370	18.539
22	22	7.597	18.542
23	23	7.708	18.544
24	24	7.999	18.548
25	25	8.875	18.562
26	26	9.597	18.574
27	27	9.424	18.571
28	28	9.649	18.575
29	29	9.401	18.571
30	30	9.458	18.572
31	31	8.784	18.560
32	32	8.978	18.563
33	33	9.041	18.564
34	34	9.315	18.569
35	35	9.408	18.571
36	36	9.509	18.573
37	37	9.575	18.574
38	38	9.646	18.575
39	39	9.800	18.578
40	40	10.393	18.590
41	41	10.458	18.592
42	42	9.471	18.572
43	43	9.537	18.573
44	44	9.537	18.573
45	45	9.808	18.578
46	46	10.025	18.583
47	47	10.697	18.597
48	48	10.775	18.599
49	49	9.964	18.581
50	50	10.155	18.585
51	51	10.746	18.598

Dari table 6 dapat dilihat bahwa penurunan besarnya nilai tegangan bus 1 sampai bus 51 bisa diperbaiki dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif hasilnya pun terbukti efektif mampu memperbaiki tegangan ke dip. Pada Gambar 6 dan 7 adalah hasil simulasi tegangan dip saat terjadi gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.



Gambar 6. Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL tipe aktif

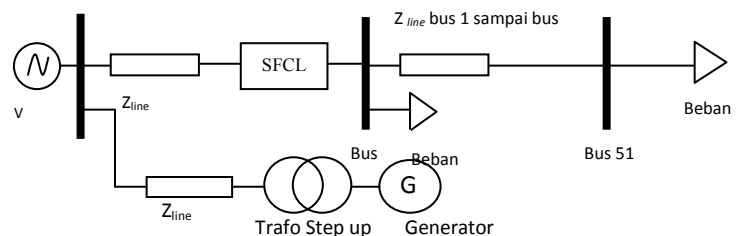


Gambar 7. Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL tipe aktif

Dari gambar 6 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, tegangan menjadi turun pada waktu $t = 0.02$ s. Pada gambar 7 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka tegangan dip dapat diperbaiki, waktu kerja SFCL untuk memperbaiki tegangan dip terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 6 dan 7 gangguan yang dimulai dari $t = 0.02$ s maka tegangan dip akan diperbaiki oleh SFCL pada waktu yang sama saat dimulainya gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi.

C. Analisis Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan Distributed Generation (DG)

Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian pada penyulang bandilan dengan menambahkan distributed generation (DG). Pemasangan DG dipasang pada Gardu Induk (sumber), seperti pada gambar 8.



Gambar 8. Penambahan generator pada jaringan distribusi

Dengan data Generator sebagai berikut :

Daya (P) = 3 MW
 $X_d = 0.19$
 $\cos \phi = 0.85$
 $kV = 6.8$ kV

Data Trafo Step Up
MVA = 8 MVA
 $X'' = 0.065$

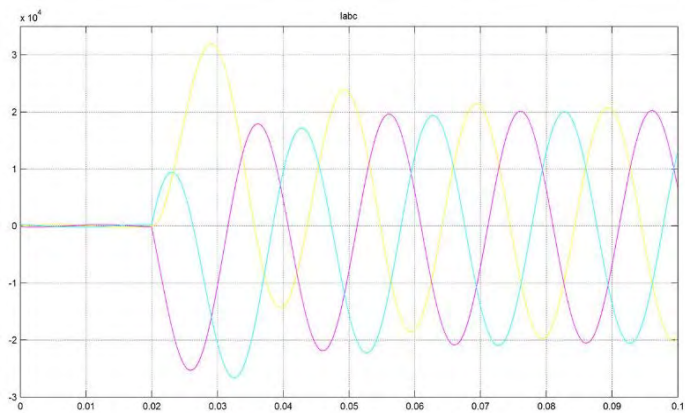
Pada analisis tugas akhir ini, akan dilakukan perhitungan besarnya arus hubung singkat apabila pada penyulang Bandilan ada penambahan DG sebelum jaringan distribusi dipasang SFCL dan setelah dipasang SFCL dilakukan dari lokasi gangguan terjadi di bus 1 sampai bus 51. Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 7. Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG

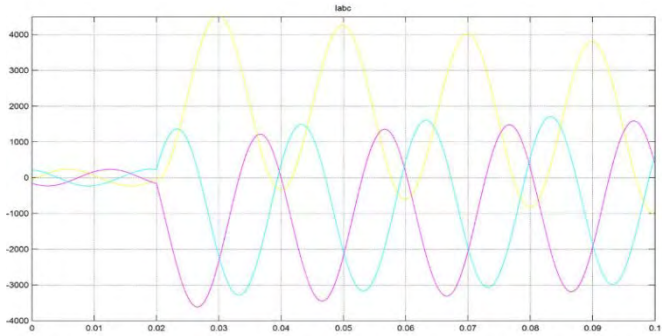
No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Arus Hubung Singkat					
		3 Phase (kA)		2 phase (kA)		1 phase (A)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	11365.65	1206.30	9842.65	1044.65	25.725	25.541
2	2	11010.39	1203.50	9535.00	1042.23	25.723	25.539
3	3	10702.49	1200.93	9268.36	1040.01	25.721	25.538
4	4	10546.50	1199.58	9133.27	1038.84	25.720	25.537
5	5	9105.52	1185.03	7885.38	1026.24	25.711	25.528

6	6	8989.50	1183.67	7784.91	1025.06	25.710	25.527
7	7	8876.25	1182.31	7686.83	1023.88	25.709	25.526
8	8	8657.74	1179.59	7497.60	1021.53	25.708	25.525
9	9	8552.30	1178.23	7406.29	1020.35	25.707	25.524
10	10	8449.31	1176.87	7317.11	1019.17	25.706	25.523
11	11	8250.37	1174.16	7144.82	1016.83	25.704	25.521
12	12	9625.21	1190.75	8335.43	1031.19	25.715	25.532
13	13	9217.20	1186.31	7982.09	1027.34	25.712	25.529
14	14	8763.51	1180.92	7589.20	1022.68	25.709	25.525
15	15	8657.74	1179.59	7497.60	1021.53	25.708	25.525
16	16	8554.39	1178.26	7408.10	1020.37	25.707	25.524
17	17	8402.74	1176.25	7276.77	1018.63	25.706	25.523
18	18	8301.22	1174.87	7188.85	1017.44	25.705	25.522
19	19	8301.22	1174.87	7188.85	1017.44	25.705	25.522
20	20	8223.24	1173.78	7121.33	1016.50	25.704	25.521
21	21	8184.78	1173.24	7088.02	1016.03	25.704	25.521
22	22	8049.19	1171.29	6970.60	1014.34	25.702	25.519
23	23	7983.03	1170.32	6913.31	1013.50	25.702	25.519
24	24	7808.21	1167.68	6761.91	1011.21	25.700	25.517
25	25	7277.41	1158.92	6302.23	1003.63	25.694	25.511
26	26	6835.36	1150.68	5919.42	996.49	25.689	25.506
27	27	6941.43	1152.75	6011.28	998.28	25.690	25.507
28	28	6803.38	1150.04	5891.72	995.94	25.688	25.506
29	29	6955.27	1153.01	6023.26	998.51	25.690	25.508
30	30	6920.78	1152.35	5993.39	997.93	25.690	25.507
31	31	7332.48	1159.89	6349.92	1004.46	25.695	25.512
32	32	7214.19	1157.80	6247.49	1002.66	25.694	25.511
33	33	7175.60	1157.11	6214.07	1002.06	25.693	25.510
34	34	7008.37	1154.02	6069.24	999.38	25.691	25.508
35	35	6951.11	1152.93	6019.66	998.44	25.690	25.508
36	36	6889.34	1151.74	5966.17	997.41	25.690	25.507
37	37	6848.78	1150.94	5931.04	996.72	25.689	25.506
38	38	6804.70	1150.07	5892.87	995.96	25.688	25.506
39	39	6710.51	1148.17	5811.30	994.31	25.687	25.504
40	40	6343.74	1140.27	5493.68	987.47	25.682	25.499
41	41	6303.72	1139.36	5459.02	986.68	25.681	25.499
42	42	6912.55	1152.19	5986.27	997.80	25.690	25.507
43	43	6871.71	1151.39	5950.90	997.11	25.689	25.507
44	44	6871.71	1151.39	5950.90	997.11	25.689	25.507
45	45	6705.35	1148.06	5806.83	994.22	25.687	25.504
46	46	6571.58	1145.27	5690.99	991.81	25.685	25.502
47	47	6155.16	1135.87	5330.37	983.66	25.679	25.496
48	48	6106.87	1134.71	5288.55	982.65	25.678	25.495
49	49	6608.89	1146.06	5723.30	992.49	25.686	25.503
50	50	6490.99	1143.54	5621.20	990.30	25.684	25.501
51	51	6125.02	1135.15	5304.27	983.04	25.678	25.496

Dari table 7 dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan lebih besar dibanding saat jaringan distribusi tidak terhubung dengan DG pada tabel 5 , hal ini karena adanya arus kontribusi dari DG saat terjadi gangguan. Dari table 7 dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan bisa direduksi dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif hasilnya terbukti efektif mampu mereduksi besarnya arus gangguan. Pada Gambar 8 dan 9 adalah hasil simulasi arus gangguan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.



Gambar 8. Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Tanpa SFCL tipe aktif



Gambar 9. Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Dan SFCL tipe aktif

Dari gambar 8 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, arus menjadi naik pada waktu $t = 0.02 \text{ s}$. Pada gambar 9 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka besarnya arus gangguan dapat dikurangi, waktu kerja SFCL untuk mengurangi arus gangguan terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 8 dan 9 arus gangguan yang dimulai dari $t = 0.02 \text{ s}$ akan direduksi oleh SFCL pada waktu yang sama dimulainya arus gangguan terjadi.

D. Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa

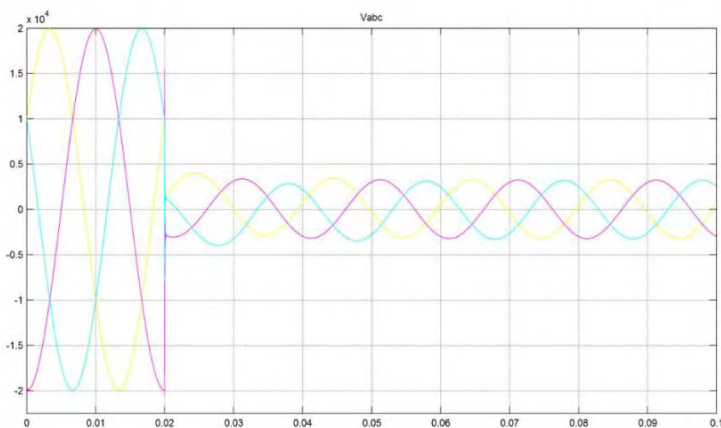
Pada analisis tugas akhir ini, akan di lakukan perhitungan tegangan dip akibat hubung singkat 3 fasa pada bus 1 sampai bus 51 apabila pada penyulang Bandilan ada penambahan DG sebelum jaringan distribusi dipasang SFCL dan setelah dipasang SFCL. Perhitungan nilai tegangan dilakukan dari bus 1 sampai bus 51. Hasil Perhitungan tegangan di tunjukan pada table 8.

Tabel 8. Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa

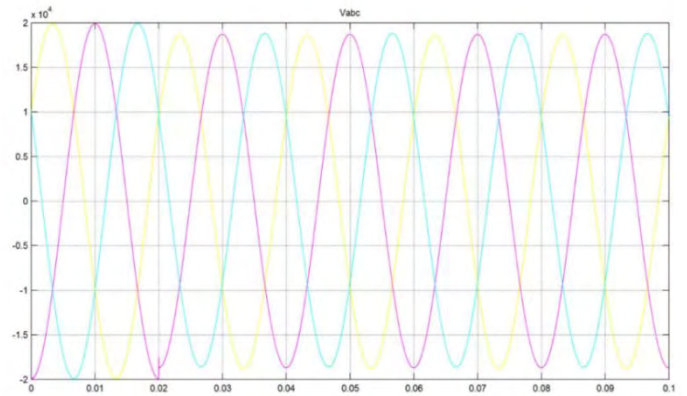
No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Tegangan Bus Akibat Arus Gangguan (kV)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	1.770	18.538
2	2	2.465	18.543
3	3	3.055	18.547
4	4	3.351	18.549
5	5	5.966	18.572
6	6	6.169	18.575
7	7	6.366	18.577
8	8	6.744	18.581
9	9	6.925	18.583
10	10	7.102	18.585
11	11	7.441	18.589
12	12	5.044	18.563
13	13	5.769	18.570
14	14	6.561	18.579
15	15	6.744	18.581
16	16	6.922	18.583
17	17	7.181	18.586
18	18	7.354	18.588
19	19	7.354	18.588
20	20	7.487	18.590

21	21	7.552	18.591
22	22	7.781	18.594
23	23	7.892	18.595
24	24	8.185	18.599
25	25	9.066	18.612
26	26	9.790	18.625
27	27	9.617	18.622
28	28	9.842	18.626
29	29	9.595	18.621
30	30	9.651	18.622
31	31	8.976	18.611
32	32	9.170	18.614
33	33	9.234	18.615
34	34	9.508	18.620
35	35	9.602	18.621
36	36	9.702	18.623
37	37	9.768	18.624
38	38	9.840	18.626
39	39	9.993	18.629
40	40	10.586	18.640
41	41	10.651	18.642
42	42	9.664	18.623
43	43	9.731	18.624
44	44	9.731	18.624
45	45	10.002	18.629
46	46	10.219	18.633
47	47	10.890	18.647
48	48	10.967	18.649
49	49	10.158	18.632
50	50	10.349	18.635
51	51	10.938	18.648

Dari table 8 dapat dilihat bahwa penurunan besarnya nilai tegangan bus 1 sampai bus 51 bisa diperbaiki dengan menggunakan SFCL tipe aktif. Dan penggunaan SFCL tipe aktif hasilnya pun terbukti efektif mampu memperbaiki tegangan dip. Pada Gambar 10 dan 11 adalah hasil simulasi tegangan dip saat terjadi gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada Bus 1.



Gambar 10. Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Tanpa SFCL tipe aktif



Gambar 11. Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Dan SFCL tipe aktif

Dari gambar 10 terlihat saat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada bus 1, tegangan menjadi turun pada waktu $t = 0.02$ s. Pada gambar 11 adalah saat jaringan ditambah dengan SFCL maka tegangan dip dapat diperbaiki, waktu kerja SFCL untuk memperbaiki tegangan dip terjadi seketika gangguan itu terjadi. Dapat dilihat pada gambar 10 dan 11 gangguan yang dimulai dari $t = 0.02$ s maka tegangan dip akan diperbaiki oleh SFCL pada waktu yang sama saat dimulainya gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dan menganalisis hasil dari perhitungan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dalam keadaan jaringan distribusi tidak ada gangguan, SFCL tipe aktif tidak akan berpengaruh terhadap jaringan distribusi karena adanya arus injeksi di belitan sekunder SFCL yang telah di kontrol nilainya untuk mengatur tegangan U_1 di belitan primer SFCL menjadi nol sehingga menyebabkan impedansi SFCL tipe aktif menjadi nol.
2. Dalam keadaan jaringan distribusi terjadi gangguan, SFCL tipe aktif akan berpengaruh terhadap jaringan distribusi karena tegangan U_1 di belitan primer SFCL naik dan tidak lagi nol sehingga menyebabkan kenaikan impedansi SFCL tipe aktif.
3. Saat terjadi gangguan hubung singkat jaringan distribusi yang diberi tambahan DG arus gangguannya lebih besar dibanding dengan jaringan tanpa DG. Hal ini karena adanya arus kontribusi dari DG saat terjadi gangguan hubung singkat.
4. Dari hasil perhitungan SFCL tipe aktif terbukti mampu mereduksi arus gangguan akibat hubung singkat secara baik, serta mampu memperbaiki tegangan dip/dip voltage.

Daftar Pustaka

1. J.-F. Moon, S.-H. Lim, J.-C. Kim, and S.-Y. Yun, "Assessment of the impact of SFCL on voltage sags in power distribution system," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp. 2161–2164, Jun. 2011.
2. J. C. Das, "Limitations of fault-current limiters for expansion of electrical distribution systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, no. 4, pp. 1073–1082, Jul./Aug. 1997.
3. F. Tosato and S. Quaia, "Reducing voltage sags through fault current limitation," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 1, pp. 12–17, Jan. 2001.
4. Gonen, Turan, "Electric Power Distribution System Engineering", McGraw-Hill, 1986. Jan. 2001.
5. A. S. Emhemed, R. M. Tumilty, N. K. Singh, G. M. Burt, and J. R. McDonald, "Analysis of transient stability enhancement of Lvconnected induction microgenerators by using resistive-type fault current limiters," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 2, pp. 885–893, May 2010.
6. S.-Y. Kim and J.-O. Kim, "Reliability evaluation of distribution network with DG considering the reliability of protective devices affected by SFCL," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 5, pp. 3561–3569, Oct. 2011.
7. Jong-Fil Moon and Jin-Seok Kim "Voltage Sag Analysis in Loop Power Distribution Sistem With SFCL," IEEE Transaction On Applied Superconductivity vol. 23, no. 3, June 2013.
8. Lei Chen, Changhong Deng, Fang Guo, Yuejin Tang, Jing Shi, and Lie Ren "Reducing the Fault Current and Overvoltage in a Distribution Sistem With Distributed Generation Units Through an Active Type SFCL," vol. 24, no. 3, Jun. 2014.

Bioografi Penulis



Arif Nugroho Lahir dikota Cilacap, Jawa tengah pada tanggal 22 mei 1990. Menyelesaikan pendidikan D3 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro di Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta pada Tahun 2011 dan melanjutkan program S1 di bidang Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun 2013 m elalui program Lintas Jalur.

ANALISIS REDUKSI ARUS GANGGUAN DAN PERBAIKAN TEGANGAN DIP PADA SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI RUNGKUT DENGAN SFCL TIPE AKTIF

Arif Nugroho

2212106045

Pembimbing 1 : Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng,
Pembimbing 2 : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT

LATAR BELAKANG

Jaringan distribusi merupakan jaringan yang paling dekat dengan konsumen/pelanggan yang mana dalam pengoperasiannya kadang terjadi gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Gangguan adalah suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari kondisi normal, salah satunya adalah hubung singkat. Gangguan hubung singkat juga mengakibatkan kedip tegangan. Untuk mengatasi hal tersebut dipasanglah SFCL (*Superconducting Fault Current Limiter*) tipe aktif untuk mereduksi arus gangguan dan memperbaiki kedip tegangan. Sehingga dapat menghindari kerusakan pada peralatan distribusi dan meningkatkan sistem keamanan dan keandalan.

PERMASALAHAN

pengaruh pemasangan SFCL tipe Aktif terhadap besarnya arus hubung singkat dan tegangan kedip.

BATASAN MASALAH

1. Analisa pada sistem jaringan distribusi Rungkut penyulang Bandilan.
2. Analisis dan simulasi akibat gangguan hubung singkat dan tegangan dip sistem jaringan distribusi Rungkut penyulang Bandilan.
3. Superconducting Fault Current Limiter yang digunakan adalah tipe aktif.
4. Perangkat lunak yang digunakan dalam analisis adalah software Matlab.

Tujuan

Untuk mengetahui pengaruh dari penambahan Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) tipe aktif terhadap besar arus gangguan dan tegangan dip yang terjadi pada sistem distribusi Rungkut.

Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri yaitu gangguan hubung singkat tiga fasa, sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri.

PERHITUNGAN ARUS HUBUNG SINGKAT

1. HUBUNG SINGKAT 3 FASA

Hubung singkat ini melibatkan ketiga fasa. Arus hubung singkat tiga fasa diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{f3\phi} = \frac{E_{ph}}{Z} \quad (1)$$

Untuk gangguan tiga fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif, nilai ekivalen Z_1 , dan tegangannya adalah E fasa (line to netral).

PERHITUNGAN ARUS HUBUNG SINGKAT

2. HUBUNG SINGKAT 2 FASA

Hubung singkat ini terjadi antara dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Arus hubung singkat antar fasa diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{f2\phi} = \frac{E_{ph} \times \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{f3\phi} \quad (2)$$

Untuk gangguan fasa ke fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif dan urutan negatif, nilai ekivalen $Z_1 + Z_2$.

PERHITUNGAN ARUS HUBUNG SINGKAT

3. HUBUNG SINGKAT 1 FASA KE TANAH

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol (Z_0), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan

$$I_f 1\phi = \frac{E_{ph} \times 3}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3)$$

Tegangana Kedip/ *Voltage Dip* Pada Sistem Radial

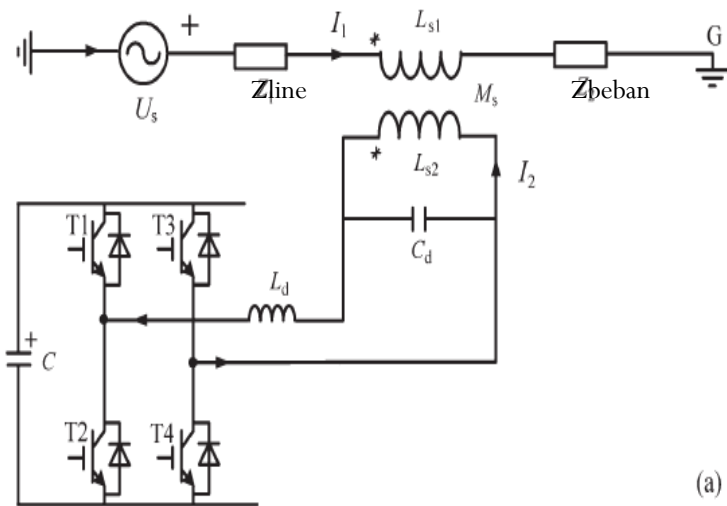
Besaran kedip digunakan sebagai fungsi jarak terhadap gangguan dinyatakan sebagai persamaan :

$$V_{sag} = \frac{Z_{line}}{Z_{sumber} + Z_{line}} V_{bus} \quad (4)$$

Z_{line} adalah impedansi dari panjang saluran/jaringan distribusi dari sumber samapai ke titik gangguan, Z_{sumber} adalah impedansi sumber jaringan sistem ditribusi dimana pada penyulang ini sumber berasal dari trafo gardu induk

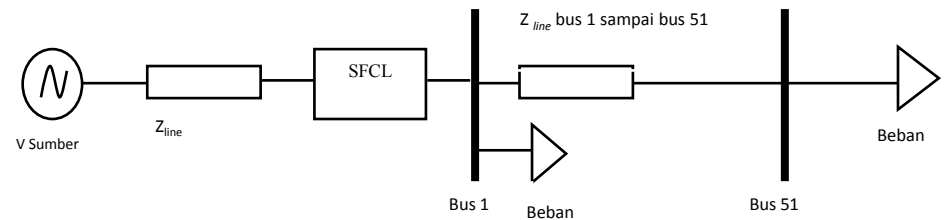
PENERAPAN SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER TIPE AKTIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI

L_{s1} dan L_{s2} adalah self-inductance dari dua buah belitan superconducting, dan M_s adalah mutual inductance. Z_{line} adalah impedansi jaringan dari sumber sampai SFCL dan Z_{beban} adalah impedansi beban. L_d dan C_d digunakan untuk filter *harmonic* orde tinggi yang dikarenakan oleh converter

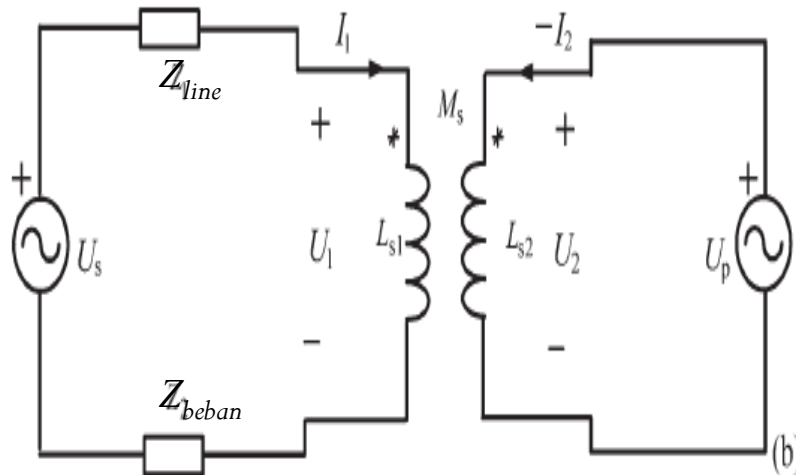


(a)

Gambar 1 Rangkaian pengganti satu fasa SFCL tipe aktif



Gambar 2 Aplikasi SFCL tipe aktif di jaringan distribusi



Gambar 3 Rangkaian ekivalen SFCL tipe aktif

Dibawah ini, penjelasan cara mengatur spesifik SFCL . Dalam keadaan normal, ada dua persamaan dapat dicapai

$$U_s = I_1(Z_{line} + Z_{beban}) + j\omega L_{s1} I_1 - j\omega M_s I_2 \quad (5)$$

Mengontrol I_2 sehingga $j\omega L_{s1} I_1 - j\omega M_s I_2 = 0$ dan tegangan primer U_1 pada belitan primer SFCL akan diatur menjadi nol. Dengan demikian Z_{SFCL} akan sama dengan nol ($Z_{SFCL} = 0$) .

Dan I_2 bisa di seting dengan cara :

$$I_2 = U_s \sqrt{L_{s1}/L_{s2}} / (Z_{line} + Z_{beban}) k \quad (6)$$

$$k = M_s / \sqrt{L_{s1} L_{s2}}$$

diamana k adalah koefisien kopling

Saat terjadi gangguan Z_{beban} mengalami hubung singkat, sehingga arus pada jaringan distribusi I_1 nilainya akan naik menjadi I_{1f} , besarnya kenaikan arus I_{1f} didapat dari arus hubung singkat maksimum, yang mana arus hubung singkat maksimum di dapat dari arus hubung singkat tiga fasa. Karena I_1 naik maka tegangan pada belitan primer SFCL U_1 juga akan naik menjadi U_{1f}

$$U_{1f} = j\omega L_{s1} I_{1f} - j\omega M_s I_2$$

$$Z_{SFCL} \text{ bisa di control : } Z_{SFCL} = \frac{U_{1f}}{I_{1f}} = j\omega L_{s1} - \frac{j\omega M_s I_2 (Z_{line} + j\omega L_{s1})}{U_s + j\omega M_s I_2} \quad (7)$$

Menurut perbedaan dalam tujuan mengatur I_2 , ada tiga mode operasi:

1. Membuat I_2 tetap dalam keadaan semula, sehingga Z_{SFCL} bisa dicari dengan :

$$Z_{SFCL} = Z_{beban} (j\omega L_{s1}) / (Z_{line} + Z_{beban} + j\omega L_{s1}) \quad (8)$$

2. Mengontrol I_2 ke nol, sehingga Z_{SFCL} bisa dicari dengan :

$$Z_{SFCL} = j\omega L_{s1} \quad (9)$$

3. Meregulasi sudut fasa I_2 untuk membuat perbedaan sudut antara U_s dengan $j\omega M_s I_2$ menjadi 180° .

Dengan menseting : $j\omega M_s I_2 = (-c) \times U_s$

$$c = - \frac{j\omega M_s I_2}{U_s}$$

$$Z_{SFCL} = c \times Z_{line} / (1 - c) + j\omega L_{s1} / (1 - c) \quad (10)$$

DATA PLANT

Tabel 1. Data Jaringan distribusi runkut penyulang bandilan

No.	Bus		Tegangan (kV)	z1 dan z2 /KM		z0 /KM		Panjang jaringan
				r	x	r	x	
1	0	1	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	232
2	0	4	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	481
3	0	5	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1016
4	0	19	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	1390
5	0	38	20	0.2162	0.3305	0.3631	1.6180	2315

Total beban = 8160 kVA

Tabel 2.Data Trafo GI 5

Kapasitas	50 MVA
kV Primer	150 kV
kV Sekunder	20 kV
Reaktansi	12.266%
Resistansi Pentanahan	500 ohm

Tabel 3.Parameter SFCL tipe aktif

SFCL Tipe aktif	
<i>Primary Inductance</i> (Ls1)	50 mH
<i>Secondary Inductance</i> (Ls2)	30 mH
<i>Mutual Inductance</i> (Ms)	32,9 mH

HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISA

Dalam keadaan normal diharapkan SFCL tidak mempengaruhi jaringan utama/distribusi. Saat keadaan normal (tanpa gangguan), arus injeksi di belitan sekunder transformer akan di kontrol nilainya.

Dengan menggunakan persamaan 6

$$I_2 = U_s \sqrt{L_{s1}/L_{s2}} / (Z_{line} + Z_{beban}) k$$

Nilai k adalah koefisien kopling yang didapat dari persamaan

$$\begin{aligned} k &= M_s / \sqrt{L_{s1} L_{s2}} \\ &= (32,9 \times 10^{-3}) / \sqrt{(50 \times 10^{-3})(30 \times 10^{-3})} \\ &= 0,8495 \end{aligned}$$

Sehingga nilai I_2 adalah :

$$\begin{aligned} I_2 &= (20000/\sqrt{3}) \sqrt{\frac{(50 \times 10^{-3})}{(30 \times 10^{-3})}} / (0,0916 + 49,0196) 0,8495 \\ &= 357,3244 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

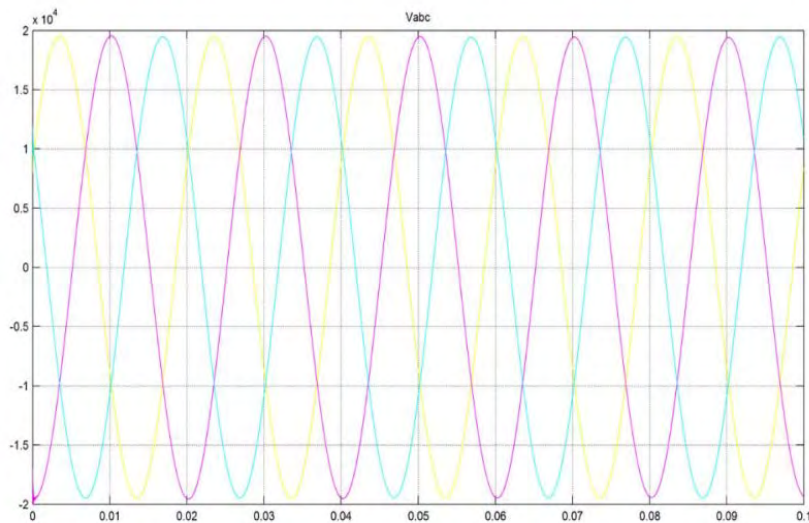
Tujuan dari mengontrol I_2 adalah untuk mengontrol tegangan di belitan primer U_1 SFCL agar nilainya nol.

Untuk mencari I_1 didapat dari persamaan berikut

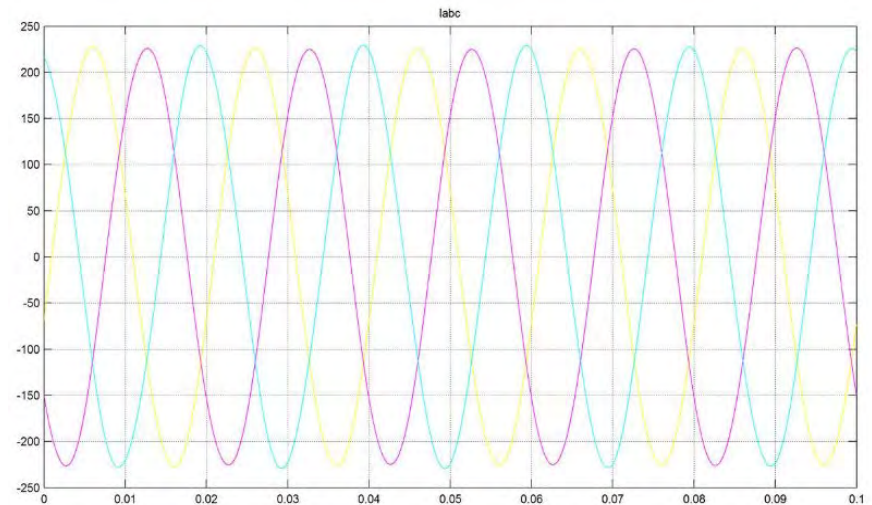
$$\begin{aligned}
 U_s &= I_1(Z_{line} + Z_{beban}), \text{ sehingga} \\
 I_1 &= U_s / (Z_{line} + Z_{beban}) \\
 I_1 &= (20000/\sqrt{3}) / (0,0916 + 49,0196) \\
 &= 235,1194 \text{ Ampere}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_1 &= j\omega L_{sl} I_1 - j\omega M_s I_2 \\
 &= (15,7080 \times 235,1194) - (10,3358 \times 357,3244) = 0 \text{ volt} \\
 Z_{SFCL} \text{ saat keadaan normal adalah :} \\
 Z_{SFCL} &= \frac{U_1}{I_1} = \frac{0}{235,1194} = 0 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

Sehingga SFCL tidak mempengaruhi I_1 yang lewat pada saat keadaan normal.



Gambar4. Gelombang Tegangan Saat Keadaan Normal



Gambar 5. Gelombang Arus Saat Keadaan Normal

Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan

Saat gangguan terjadi maka nilai arus I_1 akan naik menjadi I_{If} , hasilnya ada pada tabel 4.1, nilai I_{If} adalah arus hubung singkat maksimum, sehingga nilai U_1 juga naik menjadi U_{If} .

Pada saat terjadi gangguan tegangan pada belitan primer SFCL tidak lagi nol, dan SFCL akan menaikkan nilai impedansi yang ada di belitan primer.

besarnya Z_{SFCL} bisa dicari dengan menggunakan mode pertama .

Mode pertama membuat nilai I_2 tetap, sehingga nilai Z_{SFCL} saat terjadi gangguan adalah :

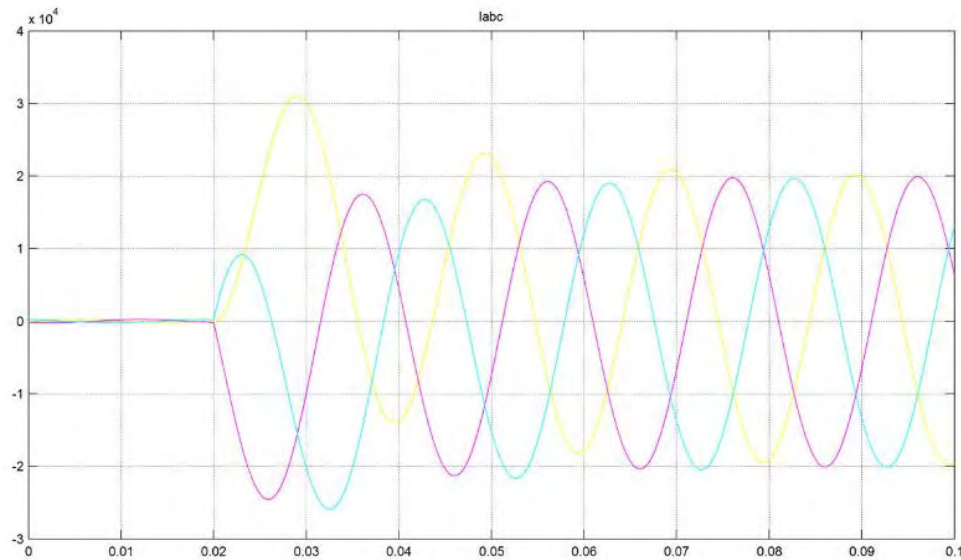
Dengan menggunakan persamaan 8, sehingga

$$\begin{aligned} Z_{SFCL} &= 49,0196 (15,7080)/(0,0916 + 49,0196 + 15,7080) \\ &= 11,8792 \text{ ohm} \end{aligned}$$

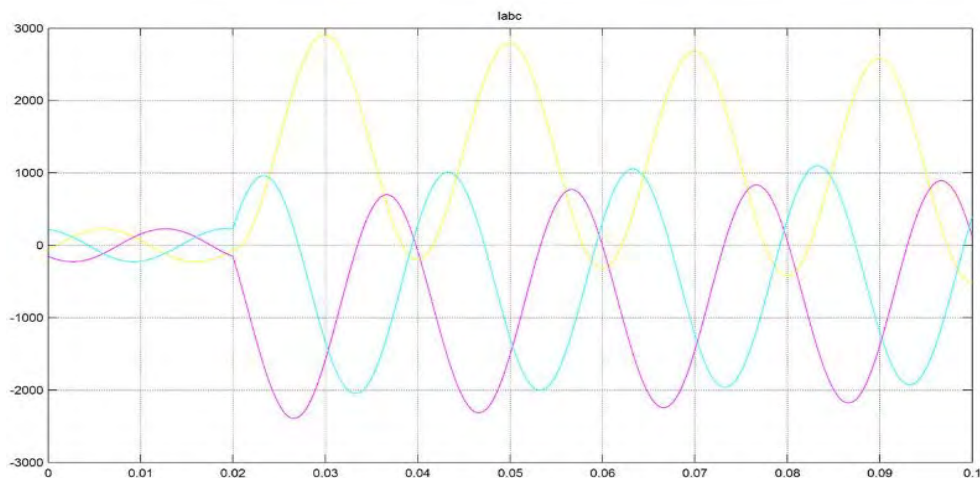
Tabel 4. Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Bandilan

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Arus Hubung Singkat					
		3 Phasa (A)		2 phasa (A)		1 phasa (A)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	10902.18	892.47	9441.29	772.88	23.0601	22.8792
2	4	10084.85	886.58	8733.48	767.78	23.0561	22.8752
3	5	8647.75	873.82	7488.95	756.73	23.0472	22.8665
4	19	7846.10	864.89	6794.73	748.99	23.0409	22.8603
5	38	6356.05	843.10	5504.34	730.13	23.0251	22.8447

Hasil Simulink



Gambar 6. Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL tipe aktif

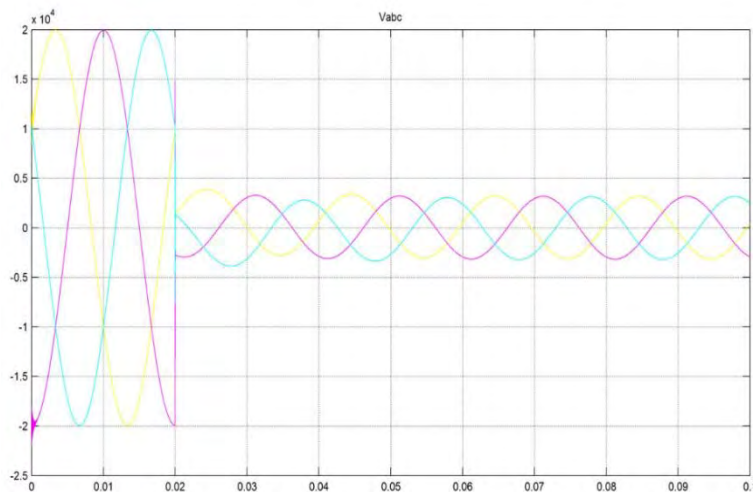


Gambar 7. Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL tipe aktif

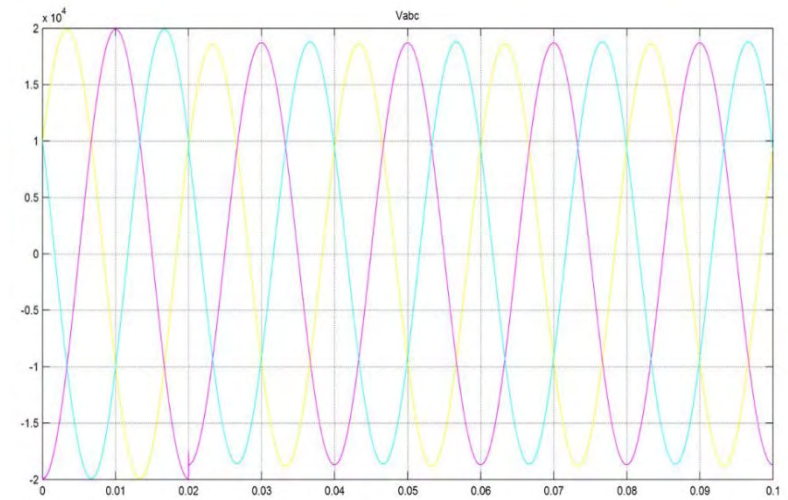
Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa

Tabel 5. Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Tegangan Bus Akibat Arus Gangguan (kV)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	1.708	18.485
2	4	3.244	18.496
3	5	5.805	18.520
4	19	7.175	18.536
5	38	9.646	18.575

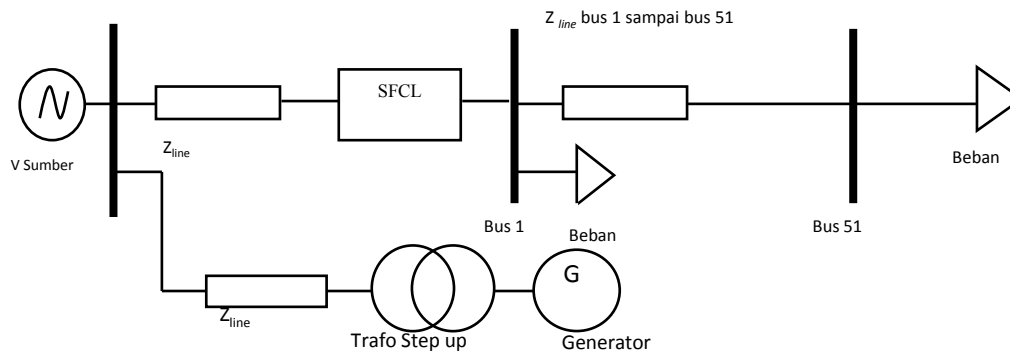


Gambar 8. Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Tanpa SFCL tipe aktif



Gambar 9. Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan SFCL tipe aktif

Analisis Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan Distributed Generation (DG)



Gambar 10 Penambahan generator pada jaringan distribusi

Asumsi dengan penambahan DG

Dengan data Generator sebagai berikut :

Daya (P) = 3 MW

$X_d = 0.19$

$\cos \varphi = 0.85$

kV = 6.8 kV

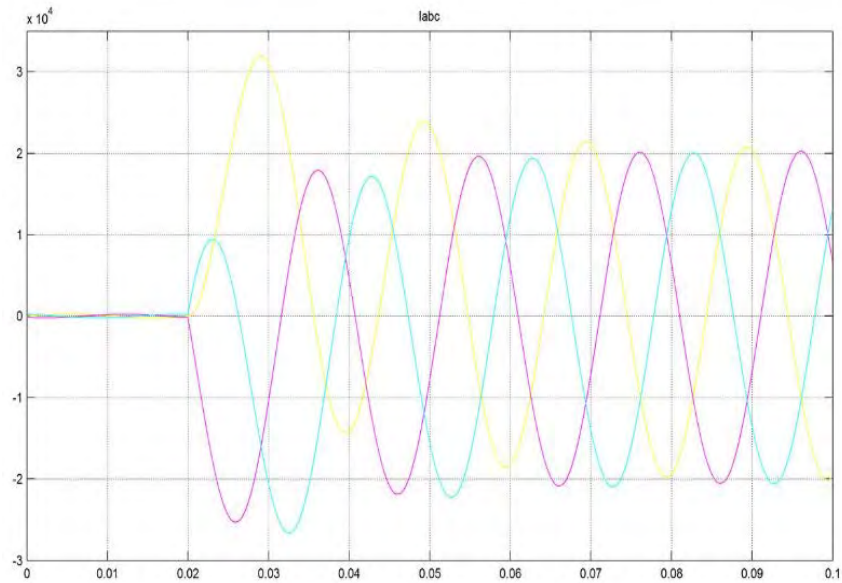
Data Trafo Step Up

MVA = 8 MVA

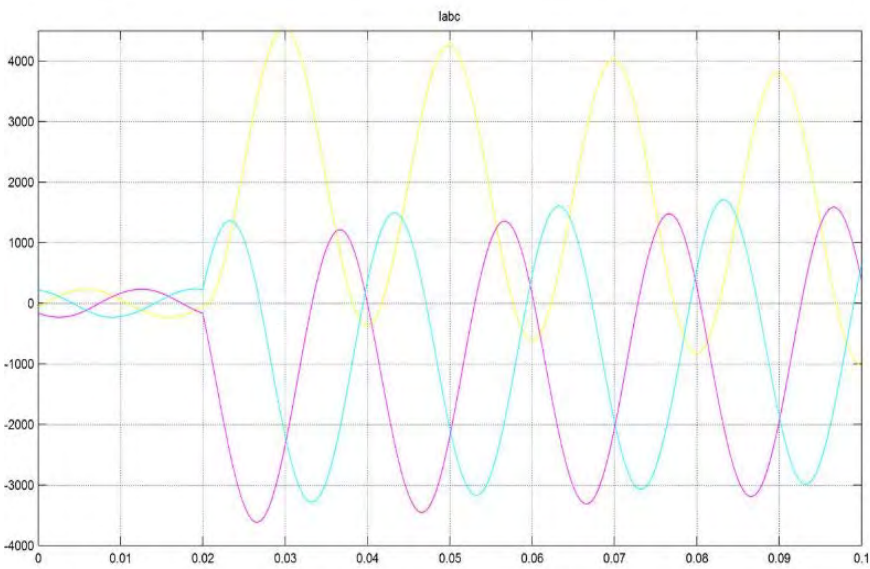
$X'' = 0.065$

Tabel 6 Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Arus Hubung Singkat					
		3 Fasa (A)		2 phasa (A)		1 phasa (A)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL	Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	11365.65	1206.30	9842.65	1044.65	25.725	25.541
2	4	10546.50	1199.58	9133.27	1038.84	25.720	25.537
3	5	9105.52	1185.03	7885.38	1026.24	25.711	25.528
4	19	8301.22	1174.87	7188.85	1017.44	25.705	25.522
5	38	6804.70	1150.07	5892.87	995.96	25.688	25.506



Gambar 11 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Tanpa SFCL tipe aktif

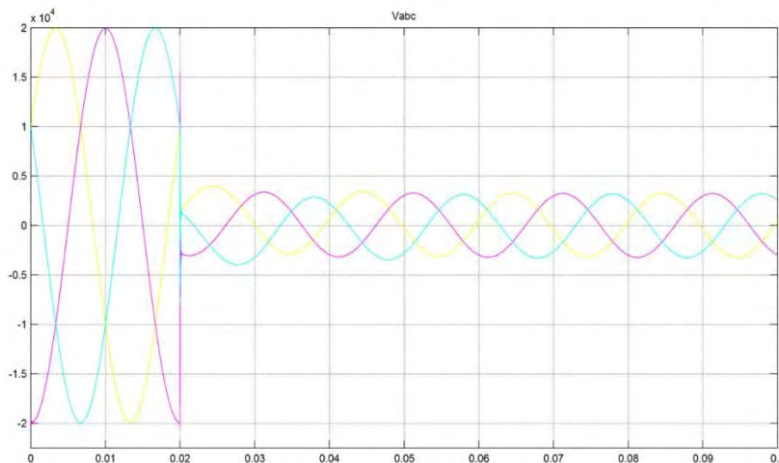


Gambar 12 Gelombang Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Dan SFCL tipe aktif

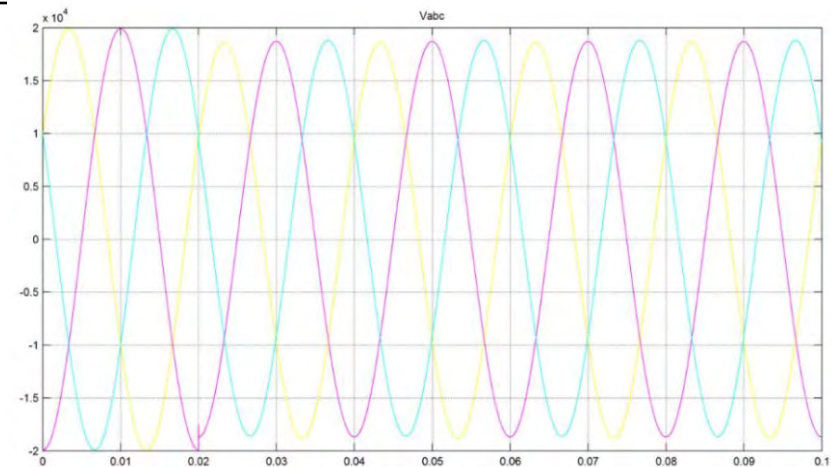
Besarnya Tegangan Dip Pada Sistem Distribusi Rungkut Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Saat Terjadi Gangguan 3 Fasa

Tabel 7 Tegangan Dip Pada Penyulang Bandilan Dengan Penambahan DG Saat Terjadi Gangguan 3 fasa

No.	Lokasi Gangguan Pada Bus	Tegangan Bus Akibat Arus Gangguan (kV)	
		Tanpa SFCL	Dengan SFCL
1	1	1.770	18.538
2	4	3.351	18.549
3	5	5.966	18.572
4	19	7.354	18.588
5	38	9.840	18.626



Gambar 13 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Tanpa SFCL tipe aktif

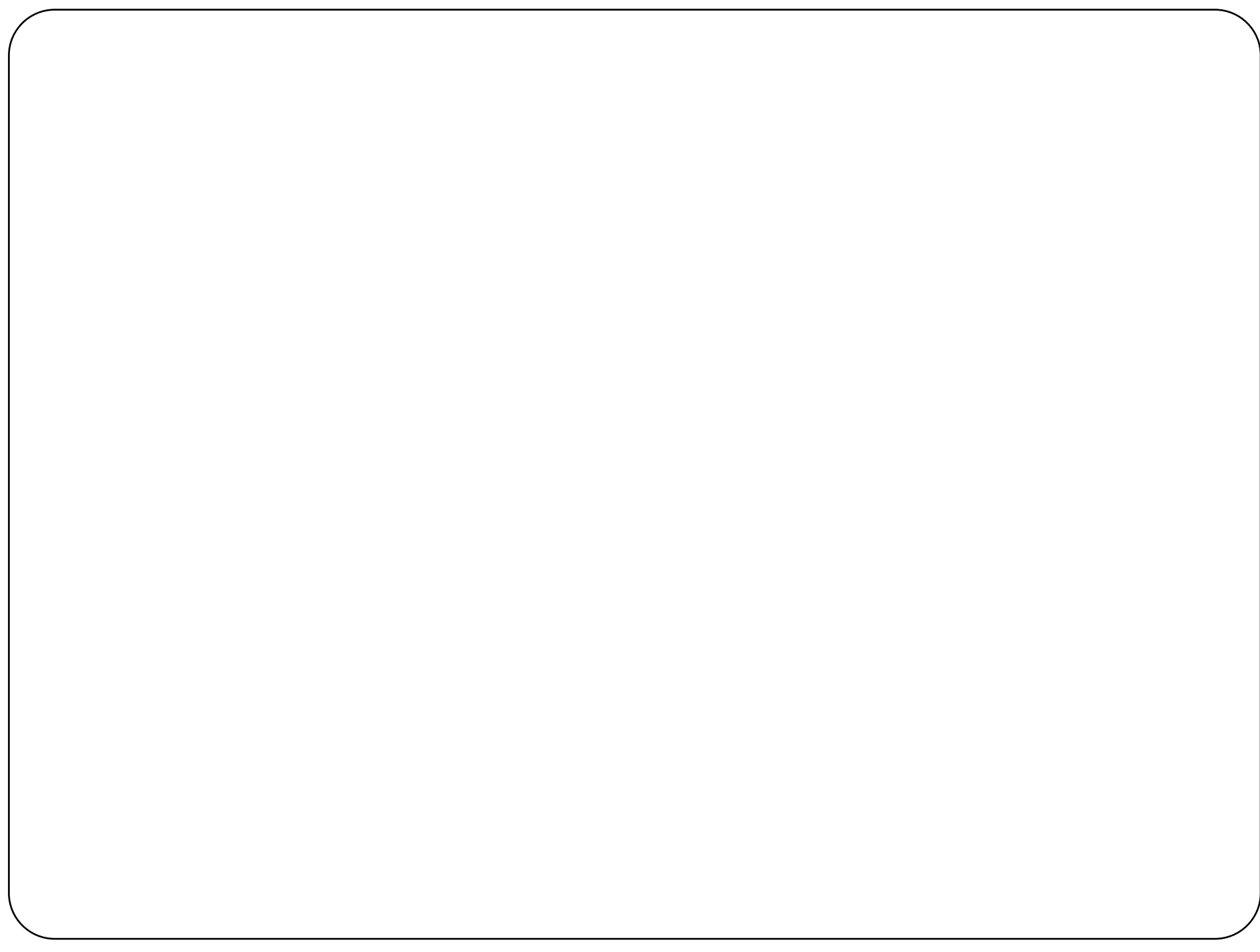


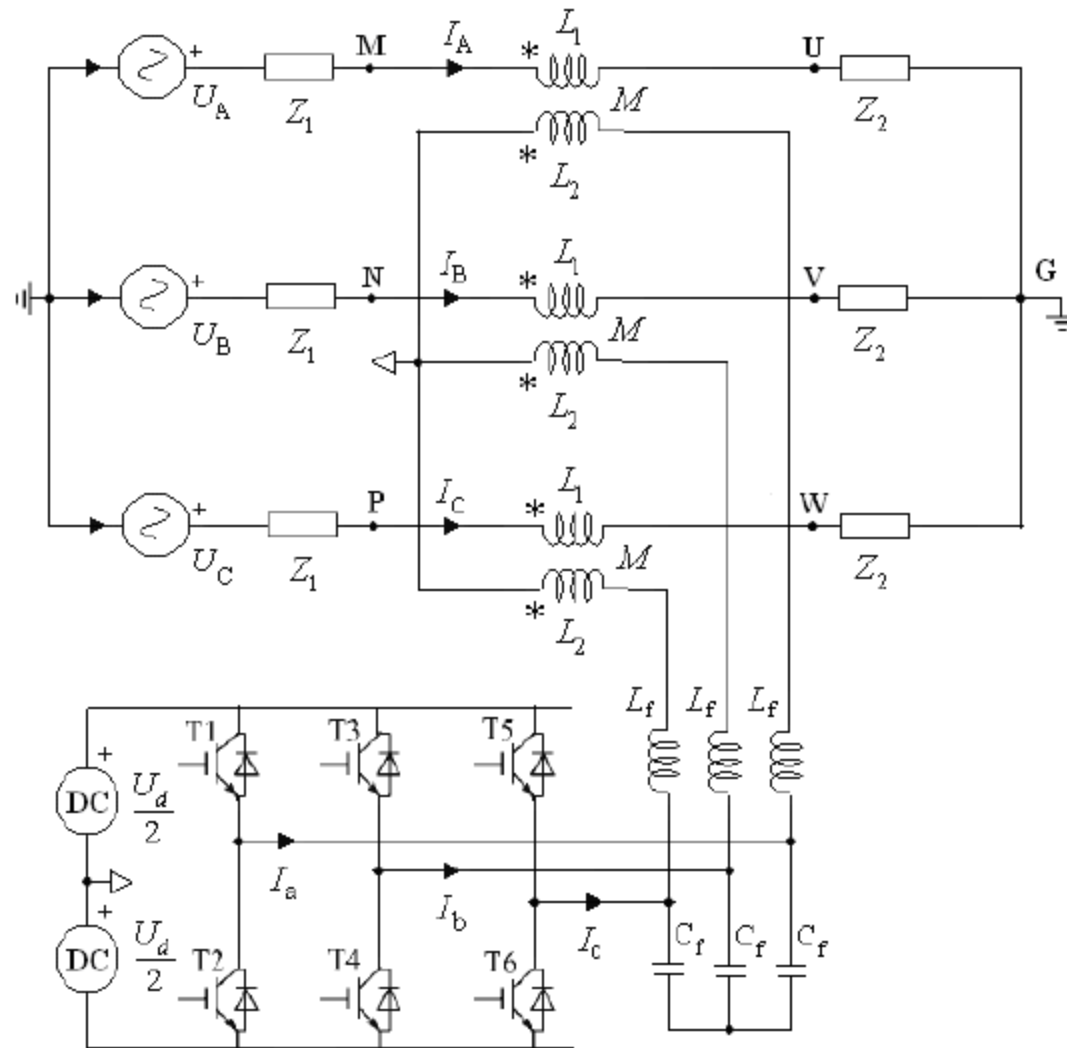
Gambar 14 Gelombang Tegangan Dip Saat Terjadi Arus Hubung Singkat 3 Fasa Dengan Penambahan DG Dan SFCL tipe aktif

KESIMPULAN

1. Dalam keadaan jaringan distribusi tidak ada gangguan, SFCL tipe aktif tidak akan berpengaruh terhadap jaringan distribusi karena adanya arus injeksi di belitan sekunder SFCL yang telah di kontrol nilainya untuk mengatur tegangan U_1 di belitan primer SFCL menjadi nol sehingga menyebabkan impedansi SFCL tipe aktif menjadi nol.
2. Dalam keadaan jaringan distribusi terjadi gangguan, SFCL tipe aktif akan berpengaruh terhadap jaringan distribusi karena tegangan U_1 di belitan primer SFCL naik dan tidak lagi nol sehingga menyebabkan kenaikan impedansi SFCL tipe aktif.
3. Saat terjadi gangguan hubung singkat jaringan distribusi yang diberi tambahan DG arus gangguannya lebih besar dibanding dengan jaringan tanpa DG. Hal ini karena adanya arus kontribusi dari DG saat terjadi gangguan hubung singkat.
4. Dari hasil perhitungan SFCL tipe aktif terbukti mampu mereduksi arus gangguan akibat hubung singkat secara baik, serta mampu memperbaiki tegangan dip/dip voltage.

TERIMA KASIH





Struktur 3 fasa SFCL tipe aktif pada jaringan sistem tenaga listrik

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anam, Sjamsul, *“Diktat Kuliah Sistem Distribusi”*, teknik Elektro ITS, Surabaya, 2013.
- [2] Wahyudi, *“Diktat Kuliah Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik”*, teknik Elektro ITS, Surabaya, 2013.
- [3] Bonggas, L Tobing, *“Peralatan Tegangan Tinggi”*, Erlangga, Medan, 2002.
- [4] PT. PLN (Persero). 1985. SPLN 64 : *“Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur Pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah”*.
- [5] PT. PLN (Persero). 1993. SPLN 108 : *“Pemutus Tenaga Mini Untuk Pembatas Dan Pengaman Arus Lebih Untuk Instalasi Gedung dan Rumah”*.
- [6] Gonen, Turan, *“Electric Power Distribution System Engineering”*, McGraw-Hill, 1986.
- [7] Jong-Fil Moon and Jin-Seok Kim *“Voltage Sag Analysis in Loop Power Distribution System With SFCL,” IEEE Transaction On Applied Superconductivity* vol. 23, no. 3, june 2013.
- [8] Lei Chen, Changhong Deng, Fang Guo, Yuejin Tang, Jing Shi, and Lie Ren *“Reducing the Fault Current and Overvoltage in a Distribution System With Distributed Generation Units Through an Active Type SFCL,”* vol. 24, no. 3, Jun.2014.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Bioografi Penulis



Arif Nugroho Lahir dikota Cilacap, Jawa tengah pada tanggal 22 mei 1990. Menyelesaikan pendidikan D3 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro di Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta pada Tahun 2011 dan melanjutkan program S1 di bidang Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun 2013 melalui program Lintas Jalur.